



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τρισδιάστατη Ανάλυση Ομάδας Πασσάλων υπό Κατακόρυφη Φόρτιση:
Αποτίμηση της Συμβολής του Κεφαλοδέσμου

FLAC3D 3.00

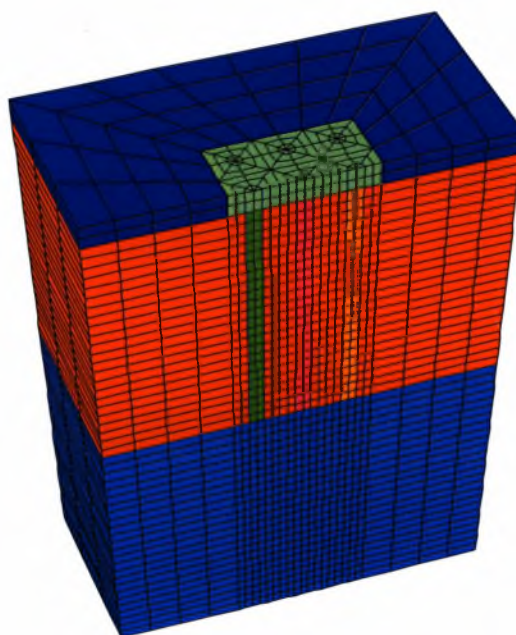
Step 45963 Model Perspective
17:54:45 Sat Aug 19 2006

Center:	Rotation:
X: -3.553e-015	X: 50.000
Y: 4.411e+000	Y: 0.000
Z: -2.130e+001	Z: 20.000
Dist: 1.650e+002	Mag.: 1.25
	Ang.: 22.500

Block Group

layer_a
layer_b
pile2
pile3
pile5
pile6
pile8
pile9
layer_c
cap

Job Title: GR3_3D_25_c1_10MN



Lab Computational Geot. Engineering
University of Thessaly

Εκπόνηση: Μηνά Χρυσαιγή

Τσώλη Χριστίνα

Επιβλέπων: Κωμοδρόμος Αιμίλιος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ

Ιούλιος 2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	6555/1
Ημερ. Εισ.:	17-09-2008
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΠΜ
	2008
	MHN

στους γονείς μας,
που ήταν πάντα δίπλα μας

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας, κ. Αιμίλιο Κωμοδρόμο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση που προσέφερε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας.

Σημαντική ήταν επίσης και η συμβολή των καθηγητών κ. Ντακούλα Π. και Παπαδημητρίου Α., οι οποίοι με εύστοχες παρατηρήσεις και διορθώσεις συνέβαλαν στη βελτίωση αυτού του συγγράμματος.

Ιδιαίτερα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την διδάκτορα κα. Μπαρέκα Σπυριδούλα για την συνεχή επιστημονική και ηθική υποστήριξη. Οι εύστοχες επισημάνσεις της έδωσαν τις κατευθύνσεις σε κρίσιμα σημεία της διαμόρφωσης της εργασίας αυτής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή.....	1
2. Απόκριση μεμονωμένου πασσάλου	
2.1 Γενικά.....	3
2.2 Οριακό και επιτρεπόμενο φορτίο.....	5
2.3	
2.3.1 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε μη συνεκτικό έδαφος.....	7
2.3.2 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε συνεκτικό έδαφος	11
2.3.3 Γερμανικός κανονισμός DIN 4014	17
2.4 Καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου.....	21
3. Ανάλυση απόκρισης ομάδας πασσάλων	
3.1 Γενικά.....	26
3.2 Απλοποιητικές μέθοδοι.....	29
3.3 Ανάλυση με χρήση αριθμητικών μεθόδων.....	33
4. Διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων σε εδαφικό σχηματισμό	
4.1 Γενικά.....	38
4.2 Αριθμητική ανάλυση.....	40
4.3 Απόκριση ομάδας πασσάλων σε αργιλικό έδαφος.....	45
4.4 Απόκριση ομάδας πασσάλων σε αμμώδες έδαφος.....	50
5. Συμπεράσματα	58

Βιβλιογραφία

Παράρτημα Α: Διαγράμματα άμμου

Παράρτημα Β: Διαγράμματα αργίλου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1. Εισαγωγή

Η θεμελίωση με πασσάλους χρησιμοποιείται ήδη από τους προϊστορικούς χρόνους με σκοπό τη μεταβίβαση των φορτίων σε βαθύτερα και καταλληλότερα εδαφικά στρώματα. Η χρήση τους θεωρείται αναγκαία σε περιπτώσεις όπου η επιφανειακή στρώση του εδάφους έχει ανεπαρκή αντοχή για να μεταφέρει τα επιβαλλόμενα κατακόρυφα φορτία. Επίσης ενδείκνυνται η χρήση τους σε εδάφη με μεγάλη συμπίεστικότητα για την αποφυγή μεγάλων καθιζήσεων σε περίπτωση χρήσης αβαθών θεμελιώσεων. Οι αυξημένες ανάγκες για εκμετάλλευση γης και δόμησης στη σύγχρονη εποχή με συνεπακόλουθο την ανάγκη χρήσης των πασσάλων ως στοιχείων θεμελίωσης έχουν επιβάλει την αξιοποίηση τέτοιων εδαφών με πολύ φτωχά χαρακτηριστικά.

Η απόκριση των θεμελιώσεων με πασσάλους αποτέλεσε και αποτελεί σημαντικό ερευνητικό πεδίο. Η συνεχής διερεύνηση του θέματος και η ανάγκη ανάπτυξης μεθοδολογιών υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλων και της απόκρισης τους οδήγησε τόσο στην αναλυτική και πειραματική μελέτη μεμονωμένων πασσάλων και ομάδων πασσάλων. Οι πρώτες απλοποιητικές προσεγγίσεις του προβλήματος αποσκοπούσαν ουσιαστικά στον έλεγχο θραύσης του στοιχείου θεμελίωσης χωρίς να δίνουν τις αναγκαίες κινηματικές πληροφορίες που επηρεάζουν την απόκριση και την τυχόν ανάπτυξη καταναγκασμών στην ανωδομή. Για το λόγο αυτό, ακόμα και την εποχή που οι υπολογιστικές μέθοδοι δεν ήταν σε θέση να δώσουν τις ανωτέρω πληροφορίες, η αναγκαιότητα γνώσης τους οδήγησε στη διεξαγωγή δοκιμαστικών φορτίσεων.

Κατά τα τελευταία τριάντα χρόνια και ειδικότερα κατά την τελευταία δεκαετία έχουν επιλυθεί ή προσεγγισθεί με ικανοποιητικό τρόπο διάφορα προβλήματα αναφορικά με την απόκριση πασσάλων υπό οριζόντια ή κατακόρυφη φόρτιση. Πολύ σημαντική πρόοδος στο πρόβλημα της απόκρισης σημειώθηκε με την εφαρμογή της μεθοδολογίας των ελατηριακών σταθερών, των οποίων η ευρεία χρήση σε συνδυασμό με την εμπειρία που αποκτήθηκε από τη διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων τις κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμες και αξιόπιστες. Η περαιτέρω εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων επέτρεψε τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση του προβλήματος. Η μέθοδος των αριθμητικών μεθόδων έρχεται συμπληρωματικά να καλύψει δύο ουσιαστικά κενά που αφήνουν πρακτικά ανέπαφα οι ανωτέρω μεθοδολογίες. Το πρώτο αφορά στην εντατική και κινηματική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους, όπου και όταν οι πληροφορίες αυτές κρίνονται αναγκαίες. Το δεύτερο αναφέρεται στον ακριβή προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων, πεδίο με αυξημένο ενδιαφέρον για τις θεμελιώσεις με πασσάλους τόσο σε πλευρική όσο και σε αξονική φόρτιση και τη μεταβολή της, συναρτήσει του εύρους της καθίζησης. Η δυσκολία στον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών της και στη μεταφορά φορτίου από τον ένα πάσσαλο στον άλλο μέσω του εδάφους. Οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων μιας ομάδας αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας για πολλούς ερευνητές στο παρελθόν. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Poulos and Davis (1980), Poulos (1989), Lee (1993), Randolph and Wroth (1978), Randolph (1994), Horikoshi and Randolph (1999), Comodromos et al. (2003) και Comodromos (2004).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται διερεύνηση της συμπεριφοράς ομάδας πασσάλων με άκαμπτο κεφαλόδεσμο τόσο σε αργιλικό όσο και σε αμμώδες έδαφος. Πιο συγκεκριμένα έγινε επιλογή διάταξης 3*3 με αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3.0D και 5.0D και διάταξη 5*5 με αξονική απόσταση 3.0D για 7 κατηγορίες εδάφους, 4 τύποι αργίλου και 3 άμμου. Οι διάμετρος των πασσάλων είναι 1 m, το δε ανηγμένο μήκος τους 25. Ο κεφαλόδεσμος έχει πάχος 2 m και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του είναι όμοια με αυτά των πασσάλων. Η ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D}.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτουν χρήσιμα ποσοτικά και ποιοτικά συμπεράσματα που αφορούν στην απόκριση ομάδας πασσάλων με κεφαλόδεσμο καθώς επίσης και στις συνέπειες της αλληλεπίδρασης των πασσάλων μελών της ομάδας.

Διάρθρωση Διπλωματικής εργασίας

Το δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής αφιερώνεται στην ανάλυση των μηχανισμών, στον τρόπο υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας και εν τέλει στον προσδιορισμό της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου. Πραγματοποιείται σύγκριση των διαφόρων μεθοδολογιών καθώς και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εμπειρικών προσεγγίσεων, δοκιμαστικών φορτίσεων και αριθμητικών μεθόδων.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται στο τρίτο κεφάλαιο για την περίπτωση ομάδων πασσάλων. Οι εμπειρικές προσεγγίσεις είναι περιορισμένες σε σχέση με το μεμονωμένο πάσσαλο, το δε πρόβλημα και οι μηχανισμοί που αναπτύσσονται είναι αισθητά πιο περίπλοκοι. Για την αποτίμηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης των πασσάλων εξετάζονται, στο επόμενο κεφάλαιο, διατάξεις ομάδας 3*3 και 5*5 με σχετική απόσταση μεταξύ των μελών της ομάδας 3.0D και 5.0D. Το σχετικό μήκος των πασσάλων λαμβάνεται ίσο με $L/D=25$ ενώ χρησιμοποιείται κεφαλόδεσμος πάχους 2.0m. Το έδαφος θεμελίωσης θεωρείται ομογενές. Ειδικότερα εξετάζονται τέσσερις περιπτώσεις αργιλικού εδάφους και τρεις περιπτώσεις αμμώδους εδάφους. Για κάθε περίπτωση πραγματοποιείται και η αντίστοιχη ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου με στόχο τη σύγκριση των αποκρίσεων.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το πέμπτο κεφάλαιο στο οποίο καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Η διπλωματική περιλαμβάνει επίσης δύο παράρτημα. Στο παράρτημα Α δίνονται τα διαγράμματα κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου στους επιμέρους πασσάλους της ομάδας συναρτήσει του ποσοστού καθίζησης για πασσάλους τοποθετημένους σε αμμώδες έδαφος ενώ στο παράρτημα Β αντίστοιχα παρουσιάζονται διαγράμματα για πασσάλους σε αργιλικό έδαφος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Απόκριση μεμονωμένου πασσάλου

2. Απόκριση μεμονωμένου πασσάλου

2.1 Γενικά

Στις πασσαλοθεμελιώσεις και γενικά στις βαθιές θεμελιώσεις, η μεταφορά των φορτίων επιτυγχάνεται μέσω της αντίστασης αιχμής και πλευρικής τριβής. Οι πάσσαλοι που διαπερνούν ένα σχετικά μαλακό στρώμα εδάφους και εδράζονται σε πιο δύσκαμπτο έδαφος, αναλαμβάνουν το φορτίο κυρίως μέσω της αντίστασης στην αιχμή τους και αποκαλούνται πάσσαλοι αιχμής. Εάν ένα πολύ μεγάλο ποσοστό του συνολικού φορτίου αναλαμβάνεται από την πλευρική τριβή που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια πασσάλου – εδάφους, τότε ο πάσσαλος έχει επικρατήσει να ονομάζεται ‘πάσσαλος τριβής’.

Η ανωτέρω ομαδοποίηση γίνεται για λόγους απλούστευσης του προβλήματος δεδομένου ότι ασχέτως ποσοστού πάντα συνυπάρχει αντίσταση τόσο από την παράπλευρη επιφάνεια όσο και από την αιχμή ενός πασσάλου. Κατά γενική ομολογία στα συνεκτικά εδάφη κυριαρχεί η φέρουσα ικανότητα της παράπλευρης επιφάνειας, ενώ στα μη-συνεκτικά εδάφη η συνεισφορά στην ολική φέρουσα ικανότητα της αιχμής και της παράπλευρης επιφάνειας είναι εξ’ ίσου σημαντική. Η διαπίστωση αυτή καταγράφεται και από τους διάφορους κανονισμούς όπου οι συντελεστές αντίστασης αιχμής είναι κατά πολύ μεγαλύτεροι στα ψαθυρά εδάφη.

Η απόκριση των θεμελιώσεων με πασσάλους αποτέλεσε και αποτελεί σημαντικό ερευνητικό πεδίο. Η συνεχής διερεύνηση του θέματος και η ανάγκη ανάπτυξης μεθοδολογιών υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλων και της απόκρισης τους οδήγησε τόσο στην αναλυτική και πειραματική μελέτη μεμονωμένων πασσάλων και ομάδων πασσάλων. Το γεγονός ότι η εφαρμογή του επιτρεπόμενου φορτίου προκαλεί πρακτικά εκδήλωση πολύ μικρών καθιζήσεων εστίασε την προσοχή των ερευνητών καταρχήν στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας και δευτερεύοντος στην απόκριση φορτίου – καθίζησης.

Το επιτρεπόμενο φορτίο ή το φορτίο σχεδιασμού υπολογίζεται συνήθως για το μεμονωμένο πάσσαλο. Το φορτίο σχεδιασμού μπορεί να καθοριστεί είτε από τις εκτιμήσεις της διατμητικής αστοχίας είτε της καθιζήσεως του πασσάλου και είναι μικρότερο από το επιτρεπόμενο φορτίο που προκύπτει από τη διαίρεση του οριακού φορτίου αστοχίας με τον κατάλληλο συντελεστή ασφάλειας, ο οποίος καλείται να καλύψει τις αβεβαιότητες της μεθόδου υπολογισμού, τα σφάλματα στην εκτίμηση των

εδάφικών παραμέτρων και τις ατέλειες στην κατασκευή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου διαφέρει από της ομάδας. Για τον καθορισμό των επιτρεπόμενων φορτίων της ομάδας χρησιμοποιούνται μεθοδολογίες οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη συμπεριφορά του μεμονωμένου.

Για τον υπολογισμό του οριακού φορτίου ενός μεμονωμένου πασσάλου και της απόκρισης του έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες. Πρώτες προσεγγίσεις του προβλήματος αποτέλεσαν οι μέθοδοι υπολογισμού του οριακού φορτίου και του αντίστοιχου επιτρεπόμενου με εφαρμογή συντελεστή ασφάλειας. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί ουσιαστικά στον έλεγχο θραύσης του στοιχείου θεμελίωσης χωρίς να δίνει τις αναγκαίες κινηματικές πληροφορίες, οι οποίες επηρεάζουν την απόκριση και τυχόν ανάπτυξη καταναγκασμών στην ανωδομή. Για το λόγο αυτό, ακόμα και την εποχή που οι υπολογιστικές μέθοδοι δεν ήταν σε θέση να δώσουν τις ανωτέρω πληροφορίες, η αναγκαιότητα γνώσης τους οδήγησε στη διεξαγωγή δοκιμαστικών φορτίσεων. Το υπερβολικό εντούτοις κόστος περιόρισε την εκτέλεση τους μόνο σε ιδιαίτερης σημασίας έργα.

Η επιστημονική πρόοδος και η συσσωρευμένη εμπειρία οδήγησαν στη βελτίωση των μεθόδων προσέγγισης του προβλήματος με τη διατύπωση, κατά το τέλος της δεκαετίας του 1960 και τις αρχές της επόμενης δεκαετίας, μεθοδολογιών ικανών να προβλέψουν την κινηματική και εντατική κατάσταση ενός πασσάλου υπό κατακόρυφη φόρτιση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εμπειρικής προσέγγισης αποτελεί ο γερμανικός κανονισμός DIN 4014. Αντίστοιχο παράδειγμα αριθμητικής προσέγγισης αποτελεί η μεθοδολογία t-z. Κατά τη μέθοδο αυτή η αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους προσομοιώνεται με ελατηριακές σταθερές, η δυσκαμψία των οποίων θεωρήθηκε σταθερή αρχικά, ενώ στη συνέχεια αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι μη-γραμμικής ανάλυσης ικανοί να ενσωματώσουν ελατήρια με μη-γραμμική συμπεριφορά. Η ευρεία χρήση των ανωτέρω προσεγγίσεων σε συνδυασμό με την εμπειρία που αποκτήθηκε από τη διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων τις κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμες και αξιόπιστες.

Η περαιτέρω εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων επέτρεψε τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και των Πεπερασμένων Διαφορών για την προσέγγιση του προβλήματος. Πρόκειται για μεθόδους ιδιαίτερα σύνθετες σε σχέση με τις απλές προγραμματιστικά υπορουτίνες της μεθόδου t-z, με αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και εν γένει μη-γραμμικό προγραμματισμό. Οι μέθοδοι αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση πολύπλοκων και ιδιαίτερων περιπτώσεων φόρτισης αλλά και για ερευνητικούς σκοπούς. Χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής αποτελεί η ικανότητα υπολογισμού οποιουδήποτε συνδυασμού φόρτισης με σύγχρονη θεώρηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κατασκευής και εδάφους λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση πασσάλου – εδάφους – πασσάλου – ανωδομής. Επιπρόσθετα η μέθοδος των αριθμητικών μεθόδων έρχεται συμπληρωματικά να καλύψει δύο ουσιαστικά κενά που αφήνουν πρακτικά ανέπαφα

οι ανωτέρω μεθοδολογίες. Το πρώτο αφορά στην εντατική και κινηματική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους, όπου και όταν οι πληροφορίες αυτές κρίνονται αναγκαίες. Το δεύτερο αναφέρεται στον ακριβή προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων, πεδίο με αυξημένο ενδιαφέρον για τις θεμελιώσεις με πασσάλους τόσο σε πλευρική όσο και σε αξονική φόρτιση, και τη μεταβολή της συναρτήσεως του εύρους της καθίζησης. Το δεύτερο αυτό πεδίο θα αποτελέσει το αντικείμενο των επομένων κεφαλαίων, καθώς συνιστά ουσιαστικά και το κύριο θέμα της διατριβής.

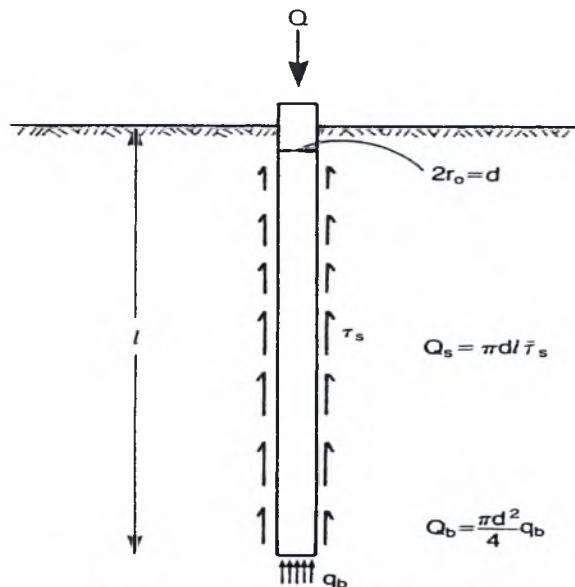
2.2 Οριακό και επιτρεπόμενο φορτίο

Το αξονικό φορτίο Q που δέχεται ένας πάσσαλος από την ανωδομή, μεταβιβάζεται στο έδαφος μέσω της αντίστασης αιχμής και της πλευρικής τριβής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Το οριακό φορτίο του πασσάλου δηλαδή το φορτίο στο οποίο αστοχεί, δίνεται από τη σχέση :

$$Q = Q_b + Q_s \quad (2.1)$$

όπου Q_s : οριακή παράπλευρη αντίσταση

Q_b : οριακή αντίσταση αιχμής



Σχήμα 2.1 Αξονική φόρτιση πασσάλου

Η οριακή αντίσταση αιχμής Q_b υπολογίζεται με χρήση της θεωρία φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_b = A_b (cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5BN_\gamma) \quad (2.2)$$

όπου A_b : το εμβαδόν βάσης του πασσάλου

c : η συνοχή του εδάφους

γ : το ειδικό βάρος του εδάφους

B : το πλάτος του πασσάλου

D_f : βάθος της αιχμής του πασσάλου κάτω από το έδαφος

N_c, N_q, N_γ : συντελεστές φέρουσας ικανότητας, οι οποίοι εξαρτώνται κυρίως από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους, τη σχετική συμπιεστότητα του εδάφους και τη γεωμετρία του πασσάλου

Κατά τις μεθόδους της κατηγορίας αυτής η οριακή παράπλευρη αντίσταση R_s μπορεί να εκτιμηθεί με ολοκλήρωση της διατμητικής αντοχής τ_a κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου – εδάφους. Η τιμή της τ_a δίνεται από την εξίσωση του Coulomb:

$$\tau_a = c_a + \sigma_n \tan \phi_a \quad (2.3)$$

όπου τ_a : διατμητική αντοχή παράπλευρης επιφάνειας

c_a : συνάφεια στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους

σ_n : ορθή τάση στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου

ϕ_a : γωνία τριβής μεταξύ πασσάλου και εδάφους

Η ορθή τάση σ_n εκφράζεται ως συνάρτηση της κατακόρυφης τάσης ως εξής:

$$\sigma_n = K_s \sigma_v \quad (2.4)$$

όπου K_s : συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων.

Με αντικατάσταση της εξίσωσης 2.4 στη 2.3 προκύπτει:

$$\tau_a = c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a \quad (2.5)$$

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης 2.5 καθ'όλο το μήκος του πασσάλου δίνεται από την εξίσωση 2.6 :

$$Q_s = \int_0^L p \tau_a dz = \int_0^L p (c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a) dz \quad (2.6)$$

όπου p : η περίμετρος του πασσάλου

L : το μήκος του πασσάλου

Η επικράτηση του ενός ή του άλλου μηχανισμού μεταφοράς του φορτίου μέσα στην ενεχόμενη γεωμάζα συνδέεται με την στρωματογραφία και τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, τη γεωμετρία του πασσάλου, τη μέθοδο εγκατάστασής του στη γεωμάζα και τέλος από τον χαρακτήρα και το μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου. Η πλήρης κινητοποίηση των μηχανισμών αντίστασης εξαρτάται από το μέγεθος της μετακίνησης και τη δυσκαμψία του εδάφους κατά μήκος και στην έδραση του πασσάλου. Οι πάσσαλοι που διαπερνούν ένα σχετικά μαλακό στρώμα εδάφους και εδράζονται σε πιο δύσκαμπτο έδαφος (πάσσαλοι αιχμής) αναλαμβάνουν το φορτίο κυρίως μέσω της αντίστασης αιχμής τους. Όταν δεν υπάρχει κάποιο έδαφος υψηλής αντίστασης στην έδραση των πασσάλων, τότε αυτοί λέγονται αιωρούμενοι πάσσαλοι ή τριβής.

Η ανωτέρω ομαδοποίηση γίνεται για λόγους απλούστευσης του προβλήματος δεδομένου ότι ασχέτως ποσοστού πάντα συνυπάρχει αντίσταση τόσο από την παράπλευρη επιφάνεια όσο και από την αιχμή ενός πασσάλου. Κατά γενική ομολογία στα συνεκτικά εδάφη κυριαρχεί η φέρουσα ικανότητα της παράπλευρης επιφάνειας, ενώ στα μη-συνεκτικά εδάφη η συνεισφορά στην ολική φέρουσα ικανότητα της αιχμής και της παράπλευρης επιφάνειας είναι εξ' ίσου σημαντική. Η διαπίστωση αυτή καταγράφεται και από τους διάφορους κανονισμούς όπου οι συντελεστές αντίστασης αιχμής είναι κατά πολύ μεγαλύτεροι στα ψαθυρά εδάφη.

Από τις εξισώσεις (2.1), (2.2) και (2.6) προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση η οποία προσδιορίζει και το οριακό φορτίο πασσάλου.

$$R = \int_0^L C(c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a) dz + A_b(c N_c + \sigma_{vb} N_q + 0.5 \gamma D N_\gamma) \quad (2.7)$$

2.3 Φέρουσα ικανότητα μεμονωμένου πασσάλου

2.3.1 Φέρουσα ικανότητα μεμονωμένου πασσάλου σε μη συνεκτικό έδαφος

Όταν οι πάσσαλοι εγκαθίστανται στα ομοιογενή μη συνεκτικά εδάφη, δημιουργείται γύρω από τον πάσσαλο μια διαταραγμένη εδαφική ζώνη μερικών διαμέτρων των πασσάλων. Στους εμπηγνυόμενους πασσάλους, αυτή η διαταραχή οδηγεί στη συμπύκνωση και την αύξηση της σχετικής πυκνότητας του περιβάλλοντος εδάφους άρα και αύξηση της γωνίας διατμητικής αντοχής. Όμως η έμπηξη πασσάλων σε πυκνή άμμο δεν συνεπάγεται απαραίτητα συμπύκνωση. Στους έγχυτους πασσάλους λόγω της χαλάρωσης της άμμου και της αποτόνωσης των τάσεων γύρω από τον πάσσαλο από την διαδικασία εκσκαφής, αναμένεται μειωμένη αντοχή σε

σχέση με την αδιατάρακτη κατάσταση. Επομένως η εγκατάσταση των πασσάλων προκαλεί αλλαγές στην περιβάλλουσα εδαφική πυκνότητα και η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων πρέπει να υπολογιστεί βασισμένη στις τροποποιημένες εδαφικές ιδιότητες. Εντούτοις, είναι δύσκολο να προβλεφθούν αυτές οι αλλαγές στις περιβάλλουσες εδαφικές ιδιότητες λόγω της εγκατάστασης πασσάλων, εξαιτίας της σύνθετης αλληλεπίδρασης μεταξύ του εδάφους και του πασσάλου κατά τη διάρκεια και μετά από την κατασκευή. Η επίδραση των αλλαγμένων εδαφολογικών όρων απεικονίζεται στο αδιάστατο εμπειρικό συντελεστή N_q και την κινητοποιούμενη τριβή, στα μη συνεκτικά εδάφη.

Αντίσταση αιχμής Q_p

Η γενική αναλυτική έκφραση (2.2) περιορίζεται πρακτικά στο δεύτερο όρο (γ, D_f, N_q) , δεδομένου ότι $c = 0$, ενώ ο τρίτος είναι αμελητέος σε σχέση με τον δεύτερο, λόγω της μικρής σχετικώς διαμέτρου του πασσάλου ως προς το μήκος του.

Οι εξισώσεις (2.8) και (2.9) δίνουν την αντίσταση αιχμής για τα μη συνεκτικά εδάφη :

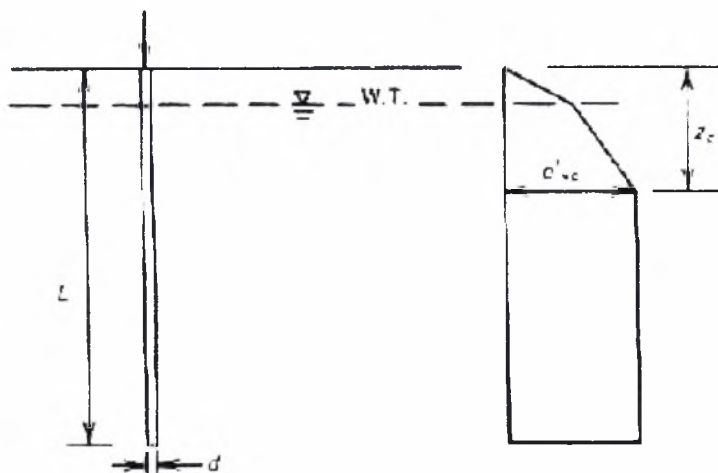
$$Q_p = A_b \gamma D_f N_q \quad (2.8)$$

ή

$$Q_p = A_b \sigma'_{vb} N_q \quad (2.9)$$

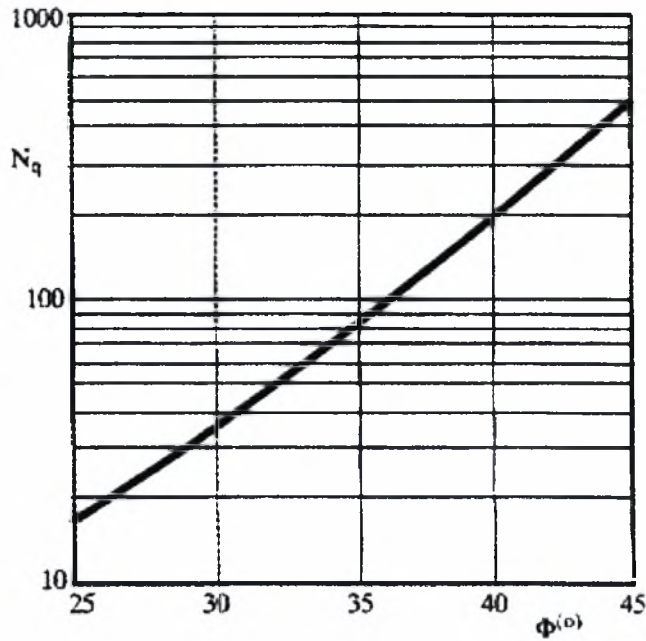
όπου, σ'_{vb} είναι η ενεργός κατακόρυφη τάση στην αιχμή του πασσάλου και N_q ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας.

Πειραματικά αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η αντίσταση αιχμής και η πλευρική τριβή αυξάνονται μέχρι ένα ορισμένο κρίσιμο βάθος, D_c . Πέρα από αυτό το βάθος, αυτές οι τιμές παραμένουν ουσιαστικά σταθερές. Αυτή η παρατήρηση για το κρίσιμο βάθος αναφέρθηκε από τον Meyerhof (1976). Για την ανάπτυξη απλής και αποτελεσματικής μεθόδου εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας η οποία να προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα προτείνεται από τους Poulos and Davis (1980), η θεώρηση ενεργών τάσεων αυξανόμενων με το βάθος μέχρι ενός κρίσιμου βάθους, πέραν του οποίου παραμένουν σταθερές (σχήμα 2.2). Η εφαρμογή αυτής της κατανομής ικανοποιεί τα δύο κύρια χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς που παρατηρήθηκαν από τον Vesic, σύμφωνα με τα οποία η μέση οριακή αντίσταση τριβής και η αντίσταση αιχμής παραμένουν αμετάβλητες πέραν από κάποιο συγκεκριμένο βάθος διεξόδου. Για τις περισσότερες των περιπτώσεων το κρίσιμο βάθος θεωρείται ότι βρίσκεται σε βάθος 20 φορές τη διάμετρο του πασσάλου αν και το βάθος αυτό μπορεί να ποικίλει από 10 έως 30 φορές τη διάμετρο (Meyerhof, 1976 Coyle και Castello, 1981).



Σχήμα 2.2 Απλοποιημένη κατανομή κατακόρυφων τάσεων παράπλευρα του πασσάλου μέσα σε άμμο (Poulos and Davis, 1980).

Ο ημιεμπειρικός συντελεστής φέρουσας ικανότητας N_q εξαρτάται από την αναλογία D_f/B , τη γωνία εσωτερικής τριβής δ του φέροντος στρώματος και τη μέθοδο εγκατάστασης των πασσάλων. Για τον προσδιορισμό της τιμής του N_q στην εξίσωση 2.1 δίνονται στη διεθνή βιβλιογραφία τιμές με σημαντικές μεταξύ τους διαφορές ειδικότερα για γωνίες τριβής μεγαλύτερες των 35° . Στο σχήμα 2.3 φαίνονται οι τιμές που προτείνονται από τους Berezantsev et al (1961) και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά. Η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής δ θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα ώστε ο τύπος του μη-συνεκτικού υλικού, η σχετική του πυκνότητα και η μέση τάση κατά την αστοχία να λαμβάνονται υπόψη. Επισημαίνεται ότι ο προσδιορισμός του συντελεστή N_q έχει βασισθεί στην υπόθεση ομοιόμορφου εδάφους άνω και κάτω της αιχμής του πασσάλου. Σε περίπτωση όπου η αιχμή διατρυπά έστω και για λίγο συμπαγές στρώμα, ενώ το έδαφος άνωθεν είναι χαλαρό, συνιστάται η εφαρμογή των τιμών του N_q που αναφέρονται στις αβαθείς θεμελιώσεις και είναι κατά κανόνα μικρότερες από αυτές των βαθιών θεμελιώσεων.



Σχήμα 2.3 Συντελεστής φέρουσας ικανότητας N_q , κατά Berezantev et al. (1961).

Πλευρική τριβή Q_s

Η πλευρική τριβή εκτιμάται γενικώς από τη εξίσωση :

$$Q_s = \int_0^L p \tau_\alpha dz = \int_0^L p (c_\alpha + \sigma_v K_s \tan \phi_\alpha) dz \quad (2.10)$$

Για τα μη συνεκτικά εδάφη ισχύει $c_\alpha = 0$ και επομένως :

$$Q_s = \int_0^L p \tau_\alpha dz = \int_0^L p \sigma_v K_s \tan \phi_\alpha dz \quad (2.11)$$

Απλοποιητική μέθοδος υπολογισμού του όρου $K_s \tan \phi_\alpha$, αποτελεί η πρόταση των Prakash and Sharma (1990) σύμφωνα με την οποία η τιμή του ϕ_α λαμβάνεται ίση με τα 2/3 της γωνίας τριβής του εδάφους ενώ η τιμή του K_s εκτιμάται σύμφωνα με τον πίνακα 2.1, ο οποίος προέκυψε ύστερα από αναλύσεις δοκιμαστικών φορτίσεων του Meyerhof (1976).

Τύπος Πασσάλου	K_s
Έγχυτος πάσσαλος	0.5
Εμπηγνύόμενος πάσσαλος τύπου Η	0.5-1.0
Εμπηγνύόμενοι πάσσαλοι με εκτόπιση	1.0-2.0

Πίνακας 2.1 Τιμές του K_s για διάφορους τύπους πασσάλων σε μη – συνεκτικά εδάφη.

Ο Meyerhof (1976) ανέλυσε τα στοιχεία δοκιμής φορτίων για να υπολογίσει τις τιμές K_s . Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η τιμή K_s και ως εκ τούτου η πλευρική τριβή, αυξάνεται με τον όγκο του εκτοπισμένου εδάφους. Επομένως, οι μικροί εμπηγνύόμενοι τύπου Η πάσσαλοι και οι έγχυτοι θα έχουν χαμηλότερες τιμές K_s από τους μεγάλους εμπηγνύόμενους πασσάλους (Meyerhof, 1976).Επίσης πρέπει να καταγραφεί ότι η αντίσταση αιχμής και η πλευρική τριβή αυξάνεται επίσης μέχρι το κρίσιμο βάθος (= 20B) πέρα από το οποίο μπορούν να είναι σταθερές.

Το οριακό φορτίο πασσάλου στα μη συνεκτικά εδάφη δίνεται τελικά από την εξίσωση (2.12) :

$$Q = Q_b + Q_s = A_b \gamma D_f N_q + \int_0^L p \sigma_v K_s \tan \phi_a dz \tag{2.12}$$

2.3.2 Φέρουσα ικανότητα μεμονωμένου πασσάλου σε συνεκτικό έδαφος

Σε αργιλικό έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες η κατάσταση της φέρουσας ικανότητας θεωρείται η πιο κρίσιμη εκτός και αν πρόκειται για υπερστερεοποιημένη άργιλο. Όταν έχουμε βραδεία φόρτιση μεγάλου χρονικού διαστήματος και δεν παρατηρείται υπερπίεση πόρων τότε αναφερόμαστε σε στραγγιζόμενες συνθήκες και η φέρουσα ικανότητα θα παίρνει συνήθως τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε αστράγγιστες συνθήκες. Σημειώνεται επίσης ότι οι καθιζήσεις που απαιτούνται για να κινητοποιήσουν τη φέρουσα ικανότητα σε στραγγιζόμενες συνθήκες είναι ιδιαίτερα μεγάλες και συχνά μεγαλύτερες από αυτές που αναλαμβάνουν οι εδραζόμενες ανωδομές. Η φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε αργιλικό έδαφος υπολογίζεται με όρους αστράγγιστων συνθηκών για τον λόγο ότι το εξασκούμενο φορτίο θα πρέπει να μην οδηγήσει σε αστοχία σε περίπτωση γρήγορης φόρτισης.

Στις πολύ ευαίσθητες αργίλους ή σκληρές αργίλους λόγω της απώλειας εδαφολογικής δομής, η τελική διατμητική αντοχή μπορεί να είναι μικρότερη από αυτήν στην αδιατάρακτη κατάσταση. Κοντά στους έγχυτους πασσάλους, προκαλείται διατάραξη του αργιλικού ιστού από τα σκαπτικά μηχανήματα και επέρχεται μαλάκυνση της αργίλου από την αποτόνωση των πλευρικών τάσεων λόγω εκσκαφής. Η εμπειρία έχει δείξει ότι δεν υπάρχει καμία σημαντική αλλαγή διατμητικής αντοχής του εδάφους με το χρόνο (Meyerhof, 1976). Για πρακτικούς περισσότερους λόγους, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διατμητική αντοχή ενός φέροντος στρώματος, που αποτελείται από μαλακής έως μέσης στριφότητας άργιλο, παραμένει αμετάβλητη κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης των πασσάλων. Οι τιμές της διατμητικής αντοχής (c_u) για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πρέπει να ληφθούν από εργαστηριακές δοκιμές που γίνονται στα αδιατάρακτα δείγματα αργίλου.

Το έδαφος κοντά στους εμπηγνυόμενους πασσάλους εκτοπίζεται και δημιουργείται γύρω από τον πάσσαλο μία διαταραγμένη εδαφική ζώνη σε έκταση μίας ή δυο διαμέτρων του πασσάλου. Η εγκατάσταση εμπηγνυόμενων πασσάλων σε κορεσμένες αργίλους συνεπάγεται την ανύψωση της εδαφικής επιφάνειας, η οποία είναι ανάλογη του εκτοπιζόμενου όγκου και την ανάπτυξη υψηλών πλευρικών πιέσεων στην γεωμάζα. Οι πιέσεις αυτές αναφέρονται κυρίως στις πιέσεις πόρων (σε όρους ολικών τάσεων) και μπορεί να είναι μέχρι και διπλάσιες της κατακόρυφης γεωστατικής τάσης. Με το χρόνο, οι στιγμιαίες δημιουργημένες υπερπιέσεις αποτονούνται, ώστε η πλευρική πίεση να τείνει στην αρχική της τιμή η οποία είναι κατά τι μικρότερη της γεωστατικής τάσης. Η μείωση των πιέσεων πόρων συνοδεύεται από επανάκτηση της διατμητικής αντοχής, η οποία σε μερικές περιπτώσεις ενδεχομένως υπερβαίνει την αντοχή του αδιατάρακτου εδάφους. Όταν η άργιλος είναι κορεσμένη, η αστράγγιστη γωνία τριβής ϕ_u αλλά και η τριβή κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους ϕ_a , θεωρούνται μηδενικές. Συνέπεια της θεώρησης αυτής αποτελεί η μοναδιαία τιμή για το συντελεστή N_q , ενώ ο συντελεστής N_γ είναι ίσος με μηδέν. Με εφαρμογή των ανωτέρω τιμών στην εξίσωση 2.7 οδηγείται κανείς στην απλούστερη μορφή της, 2.13:

$$Q = \int_0^L p c_a dz + A_b (c_u N_c + \sigma_{vb}) \quad (2.13)$$

όπου c_u : η συνοχή του εδάφους στο επίπεδο της αιχμής του πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες

c_a : η συνάφεια εδάφους - πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες

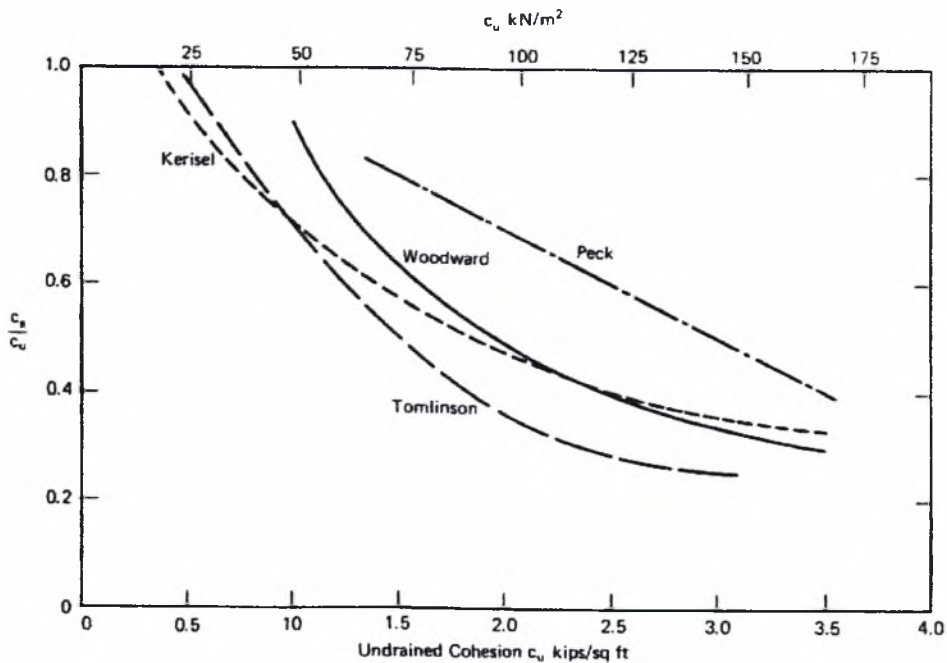
Η συνάφεια c_a πασσάλου-εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του πασσάλου, τη μέθοδο κατασκευής του καθώς και τη σύσταση και τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Υπό ιδεατές συνθήκες η συνάφεια θα μπορούσε να υπολογιστεί από την εκτέλεση δοκιμαστικής φόρτισης με κατάλληλη ενοργάνωση.

Δεδομένου εντούτοις ότι αυτό δεν είναι εφικτό παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις σημαντικών έργων, χρησιμοποιούνται εμπειρικές τιμές. Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές προσπάθειες συσχέτισης της συνάφειας με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u , τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται από τους Tomlinson (1957,1970), Woodward et al. (1961), Coyle and Reese (1966), McClelland (1974) και άλλους ερευνητές.

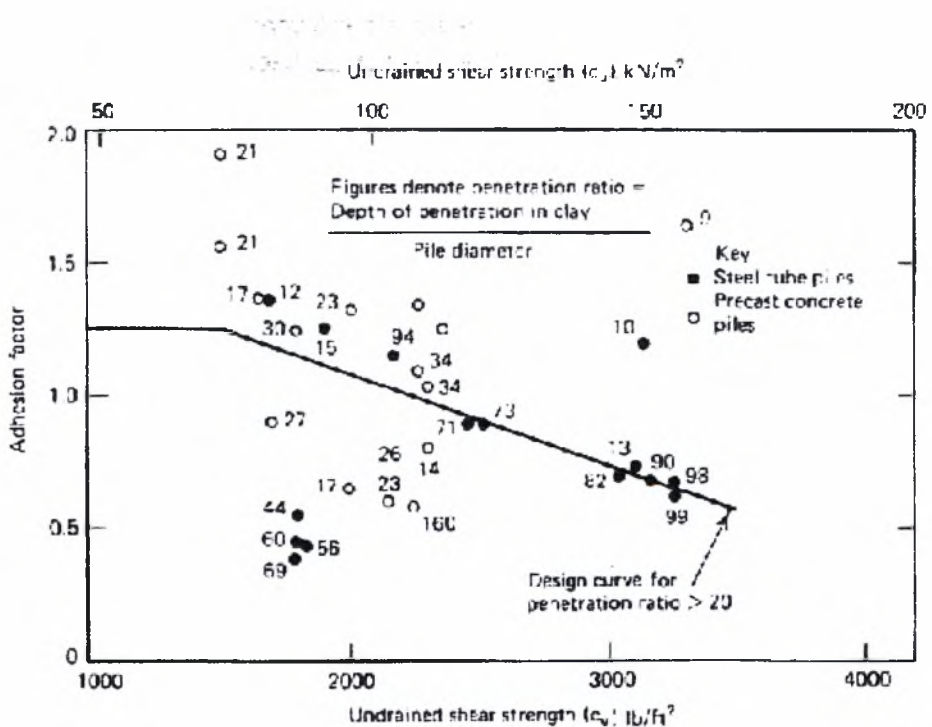
Στο σχήμα 2.4 δίνεται η μεταβολή του λόγου c_a/c_u συναρτήσει της τιμής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u (McClelland, 1974). Γενική παραδοχή αποτελεί η υιοθέτηση μοναδιαίου λόγου $c_a/c_u=1$ για μαλακές αργίλους ($c_u < 25$ kPa). Αντίθετα για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε σφιγρή άργιλο ο λόγος παίρνει τιμή μικρότερη της μονάδας. Το εύρος διακύμανσης του λόγου στην περίπτωση των σφιγρών αργίλων καθορίζεται και από τις επιπτώσεις της διαδικασίας έμπηξης. Μετά από βαθύτερη διερεύνηση του θέματος ο Tomlinson (1970) καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο λόγος c_a/c_u επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από το εδαφικό στρώμα που υπέρκειται της σφιγρής αργίλου, όσο και από την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u , (σχήματα 2.5 και 2.6). Νωρίτερα ο ίδιος ερευνητής είχε προτείνει ως οδηγό εκτίμησης της συνάφειας c_a για εμπηγνυόμενους πασσάλους το διάγραμμα του σχήματος 2.7 (Tomlinson, 1963). Τα διαθέσιμα δεδομένα για τη μεταβολή του λόγου c_a/c_u στην περίπτωση των έγχυτων πασσάλων είναι περιορισμένα και τα περισσότερα από αυτά αναφέρονται στην άργιλο του Λονδίνου. Στον πίνακα 2.2 δίνονται οι τιμές c_a/c_u συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u από αδιατάρακτα δοκίμια, καθώς επίσης και συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u από αναζυμωμένα δοκίμια. Οι Skempton, Meyerhof και Murdock (1959) πρότειναν ως άνω όριο της c_a την τιμή των 96 kPa.

Τύπος εδάφους	Συντελεστής συνάφειας	Τιμή	Αναφορά
Άργιλος Λονδίνου	c_a/c_u	0.25-0.7	Golder & Leonard (1954)
		μέση	Tomlinson (1957)
		τιμή: 0.45	Skempton (1959)
Ευαίσθητη άργιλος	c_a/c_r	1	Golder (1957)
Άργιλος μεγάλης διαστατικότητας	c_a/c_u	0.5	Mohan & Chandra (1961)

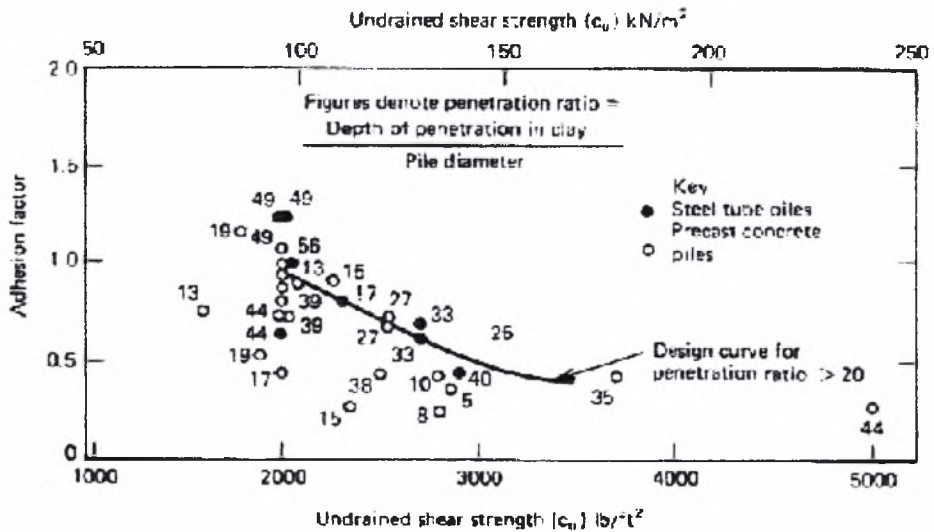
Πίνακας 2.2 Τιμές του συντελεστή συνάφειας για έγχυτους πασσάλους σε άργιλο



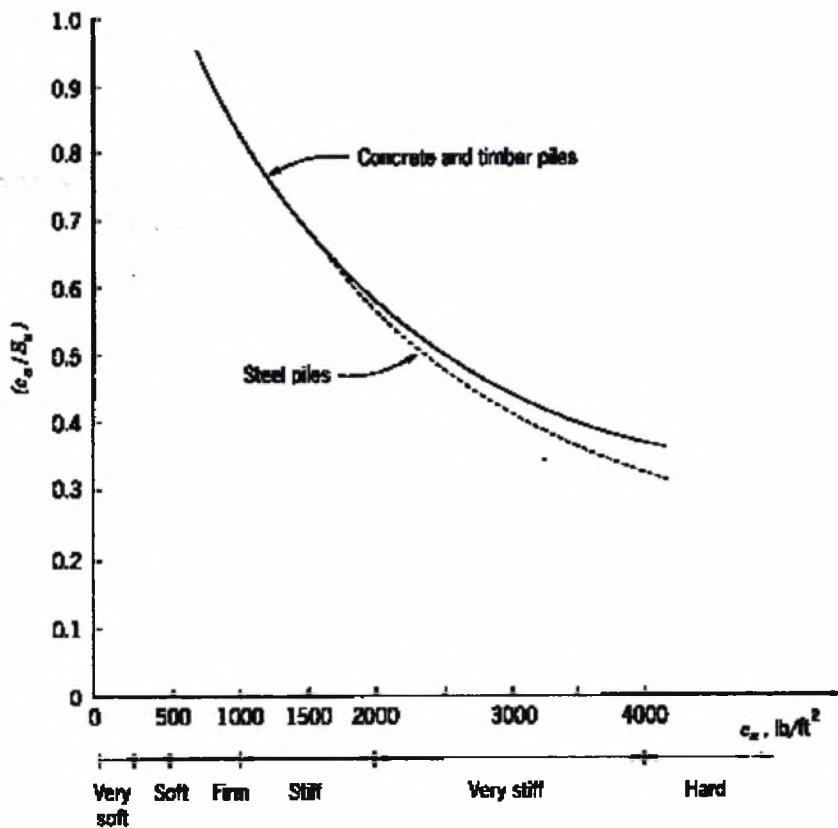
Σχήμα 2.4 Συντελεστής συνάφειας για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε άργιλο (McClelland, 1974).



Σχήμα 2.5 Συντελεστής συνάφειας για την περίπτωση όπου αμμόδες έδαφος υπέρκειται σιφρού συνεκτικού εδάφους (Tomlinson, 1970).



Σχήμα 2.6 Συντελεστής συνάφειας για την περίπτωση σιφρού συνεκτικού εδάφους χωρίς υπερκείμενο (Tomlinson, 1970).



Σχήμα 2.7 Κατανομή του λόγου c_u/S_u συναρτήσει του c_u για διάφορους τύπους αργίλου και για εμπηγνυόμενους πασσάλους (Tomlinson, 1963)

Η φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε σφιγρή ή υπερστερεοποιημένη άργιλο, θεωρείται αντιπροσωπευτική για στραγγιζόμενες συνθήκες παρά για αστράγγιστες. Κατά την εγκατάσταση και την εν συνεχεία φόρτιση του πασσάλου η τάση σ'_v αυξάνεται μερικώς λόγω μεταφοράς του φορτίου από το πάσσαλο στο περιβάλλον έδαφος καθώς επίσης και λόγω ανάπτυξης αρνητικών υπερπίεσεων πόρων (υπό αστράγγιστες συνθήκες). Κατά τη θεώρηση αυτή η αντίσταση της παράπλευρης επιφάνειας προσδιορίζεται με βάση τη γωνία τριβής της διεπιφάνειας ϕ'_α σε συνθήκες στράγγισης και ταυτόχρονη θεώρηση μηδενικής συνάφειας. Η συμβολή των συντελεστών N_c και N_γ αγνοείται και η εξίσωση 2.7 μετασχηματίζεται σε:

$$Q_s = \int_0^L p \sigma'_v K_s \tan \phi'_\alpha dz + A_b \sigma'_{vb} N_q \quad (2.14)$$

όπου σ'_v : η ενεργός κατακόρυφη τάση σε βάθος z

σ'_{vb} : η ενεργός κατακόρυφη τάση στο επίπεδο της αιχμής του πασσάλου

ϕ'_α : η γωνία τριβής ανάμεσα στον πάσσαλο και το έδαφος υπό συνθήκες στράγγισης

Οι Chandler (1968) και Burland (1973) πρότειναν για τον προσδιορισμό του όρου τριβής β την ακόλουθη απλοποιημένη σχέση:

$$\beta = K_s \tan \phi'_\alpha = (1 - \sin \phi') \tan \phi' \quad (2.15)$$

όπου ϕ' : η ενεργός γωνία τριβής για αργιλικό σχηματισμό

Ο συντελεστής β για τυπικές ενεργές γωνίες τριβής $\phi' = 15^\circ - 30^\circ$ κυμαίνεται μεταξύ 0.20 έως 0.29. Για έγχυτους πασσάλους σε NC αργίλους συστήνεται η τιμή 0.30. Κατά Meyerhof (1976) ο παράγων β κυμαίνεται μεταξύ 0.20 - 0.40 για κοντούς πασσάλους (μικρότερους των 15m) και μεταξύ 0.10 - 0.25 για πολύ μακρύς πασσάλους. Σύμφωνα με τους Poulos and Davis (1980) αύξηση του μήκους οδηγεί σε μείωση της τιμής β , με θεώρηση $\beta = 0.15$ για πασσάλους μεγάλους μήκους (μήκος πέραν των 60 m). Ο συντελεστής πλευρικών πιέσεων K εκλαμβάνεται συνήθως με τιμή μεταξύ K_o και K_p (παθητική κατάσταση κατά Rankine) για εμπηγνυόμενους πασσάλους και μεταξύ K_o και K_α (ενεργητική κατάσταση κατά Rankine) για έγχυτους πασσάλους. Για κανονικά φορτισμένες (NC) αργίλους ισχύει η εμπειρική σχέση:

$$K_{o(NC)} = 0.95 - \sin \phi \quad (2.16)$$

Ενώ για προφορτισμένες αργίλους:

$$K_{\sigma_{(OC)}} = K_{\sigma_{(NC)}} \sqrt{OCR} \quad (\text{Poulos and Davis, 1980}) \quad (2.17)$$

Στην περίπτωση των OC αργίλων η τιμή των συντελεστών K_o, K δεν είναι πλέον σταθερή κατά το βάθος. Κατά τον Meyerhof ο συντελεστής K κυμαίνεται μεταξύ $0.7K_o$ και $1.2K_o$ για έγχυτους πασσάλους και μεταξύ K_o και $2K_o$ για εμπηγνυόμενους πασσάλους.

2.3.3 Γερμανικός κανονισμός DIN 4014

Η προτεινόμενη κατά τον γερμανικό κανονισμό μεθοδολογία καθορίζει το πλαίσιο για το σχεδιασμό κατακόρυφα φορτιζόμενων πασσάλων, ενώ τονίζει ότι ο αξιόπιστος σχεδιασμός απαιτεί χρήση αριθμητικών μεθόδων και αναλυτικών υπολογισμών καθώς και δοκιμαστικών φορτίσεων. Βρίσκει εντούτοις ευρύ πεδίο εφαρμογής δεδομένου ότι εμπεριέχει ποιοτική και ποσοτική αξιοποίηση δεκάδων δοκιμαστικών φορτίσεων. Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι αποτελεί συντηρητική προσέγγιση ώστε να καλύπτει προς την πλευρά της ασφάλειας τη στατιστική επεξεργασία από την οποία προκύπτουν οι προτεινόμενες από αυτόν τιμές μοναδιαίας πλευρικής αντίστασης και αντίστασης αιχμής. Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμη ότι οι προτεινόμενες τιμές βρίσκουν πεδίο εφαρμογής ελλείψει αποτελεσμάτων δοκιμαστικής φόρτισης.

Για τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας ο γερμανικός κώδικας DIN 1054 (1976) δίνει τους θεμελιώδεις κανόνες και αποτελεί τη βασική αρχή στα γεωτεχνικά θέματα της Γερμανίας. Ο κώδικας DIN 1054 αποτελεί επίσης το πλαίσιο για το σχεδιασμό πασσάλων, ενώ οι κώδικες DIN 4014 για έγχυτους πασσάλους και DIN 4026 για εμπηγνυόμενους πασσάλους δίνουν πιο λεπτομερείς συστάσεις για το σχεδιασμό και την κατασκευαστική ακολουθία των συγκεκριμένων πασσάλων.

Η διαδικασία που ακολουθείται από το DIN 4014 για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας έγχυτων πασσάλων περιγράφεται παρακάτω.

Η αντίσταση του πασσάλου R υπολογίζεται ως το άθροισμα της αντίστασης αιχμής R_b και της ολικής αντίστασης τριβής στην παράπλευρη επιφάνεια R_s .

$$R_{(s)} = R_{b(s)} + R_{s(s)} \quad (2.18)$$

Τόσο η αντίσταση αιχμής όσο και η αντίσταση τριβής εξαρτώνται από την καθίζηση s της κεφαλής του πασσάλου, τη διάμετρο D του πασσάλου (ή τη διάμετρο D_f της διευρυμένης βάσης, αν υπάρχει) και από την αντοχή του εδάφους που εκφράζεται από το q_{ck} ή το c_{uk} . Η αντοχή του εδάφους ταξινομείται για τα μη συνεκτικά εδάφη σύμφωνα με τη χαρακτηριστική τιμή της αντοχής διείσδυσης q_{ck} και για τα

συνεκτικά σύμφωνα με τη χαρακτηριστική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_{uk} . Η αντοχή διείσδυσης κώνου q_{ck} καθορίζεται από την αντίστοιχη δοκιμή διείσδυσης κώνου CPT ή από δοκιμή δυναμικής διείσδυσης. Εάν είναι αδύνατον να διεξαχθεί η CPT, εξαιτίας για παράδειγμα παρουσίας χαλικιών, τότε χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα δοκιμής δυναμικής διείσδυσης DPH με τη συσχέτιση:

$$q_{ck} \text{ (MPa)} = N_{10} \text{ (αριθμός χτύπων για διείσδυση 10 cm)} \quad (2.19)$$

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_{uk} μπορεί να καθοριστεί για συνεκτικά εδάφη από δοκιμή διείσδυσης κώνου, από δοκιμή πτερυγίου ή από εργαστηριακές δοκιμές.

Στο DIN 4014 δίνονται 4 πίνακες με εμπειρικές τιμές για την αντίσταση αιχμής $q_{bk(s)}$ (MPa) και για την οριακή πλευρική τριβή q_{slk} (q_{ck}) για μη συνεκτικά εδάφη και ένας πίνακας για την οριακή αντίσταση τριβής q_{slk} (c_{uk}) για συνεκτικά εδάφη. Ο πίνακας 2.3 δίνει τις τιμές για αντίσταση αιχμής $q_{bk(s)}$ για μη συνεκτικά εδάφη και ο πίνακας 2.4 για την οριακή πλευρική τριβή q_{slk} . Οι τιμές για την $q_{bk(s)}$ ποικίλουν ανάμεσα στο 0.7 και 4 MPa και εξαρτώνται από την αντοχή του εδάφους, η οποία περιγράφεται από την αντοχή διείσδυσης κώνου, αλλά και από το λόγο καθίζησης s προς τη διάμετρο D . Οι τιμές της οριακής πλευρικής τριβής q_{slk} ποικίλουν ανάμεσα στα 0 και 0.12 MPa. Οι πίνακες 2.5 και 2.6 συνοψίζουν τις εμπειρικές τιμές για συνεκτικά εδάφη από το DIN 4014. Αν επιχειρηθεί σύγκριση των τιμών για τα συνεκτικά και τα μη συνεκτικά εδάφη παρατηρείται ότι οι τιμές των μη συνεκτικών εδαφών είναι ελαφρώς μεγαλύτερες.

Με τις παραπάνω εμπειρικές τιμές μπορούν να υπολογισθούν η αντίσταση στη βάση του πασσάλου $R_{b(s)}$ και η οριακή αντίσταση κατά μήκος του άξονα R_s .

$$R_{b(s)} = q_{sk(s)} \pi \frac{D_f^2}{4} \quad (2.20)$$

$$R_s = \pi D \sum (q_{slk} L_i)$$

Η χαρακτηριστική τιμή της οριακής φέρουσας ικανότητας R_k του πασσάλου, όπως καθορίζεται από την παραπάνω μέθοδο, θεωρείται ότι κινητοποιείται για την οριακή καθίζηση $s_g = 0.1D$ και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R_{k(sg)} = R_{bk(s)} + R_{sk(s)} = q_{bk(sg)} \pi \frac{D_f^2}{4} + \pi D \sum (q_{slk(s)} L_i) \quad (2.21)$$

Για πασσάλους οι οποίοι εδράζονται σε βράχο ο DIN 4014 προσφέρει και πάλι εμπειρικές τιμές για τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας πασσάλων. Ο πίνακας 2.8 δίνει τις εμπειρικές τιμές της οριακής αντίστασης αιχμής και της οριακής πλευρικής τριβής, οι οποίες εξαρτώνται από την χαρακτηριστική αντοχή σε μονοαξονική θλίψη q_{uk} του βράχου. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμες δοκιμαστικές φορτίσεις για παρόμοιες εδαφικές συνθήκες, η οριακή φέρουσα ικανότητα υπολογίζεται από την εξίσωση 2.21.

Οι προτάσεις του DIN 4014 για πασσάλους εδραζόμενους σε βράχο αγνοούν το γεγονός ότι η φέρουσα ικανότητα τους επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα συστήματα ασυνεχειών που διατρέχουν το βράχο. Οι τιμές της οριακής αντίστασης αιχμής και της πλευρικής αντίστασης δεν είναι μόνο συνάρτηση της χαρακτηριστικής μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής q_{uk} του βράχου, αλλά και των ιδιοτήτων και της κατεύθυνσης των ασυνεχειών.

δείκτης καθίζησης S/D ή S/D _F	χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής q_{bk} (MPa)*			
	για μέση τιμή αντίστασης διείσδυσης κώνου q_{sk} (MPa)			
	10	15	20	25
0.02	0.7	1.05	1.4	1.75
0.03	0.9	1.35	1.8	2.25
0.1=S _a	2	3	3.5	4
* ενδιάμεσες τιμές θα πρέπει να λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή. Εάν ο έγχυτος πάσσαλος έχει διευρυμένη βάση, τότε όλες οι τιμές μειώνονται κατά 75%				

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικές τιμές αντίστασης αιχμής q_{bk} , εξαρτώμενες από το δείκτη καθίζησης s/D και τη μέση αντίσταση διείσδυσης κώνου q_{sk} σε μη συνεκτικά εδάφη κατά DIN 4014.

αντοχή μη συνεκτικού εδάφους όπως καθορίζεται από την αντίσταση διείσδυσης κώνου q_{ck} (MPa)	χαρακτηριστική οριακή πλευρική τριβή q_{slk} (MPa)*
0	0
5	0.04
10	0.08
≥ 15	0.12
* ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται από γραμμική παρεμβολή.	

Πίνακας 2.4 Χαρακτηριστικές τιμές της οριακής πλευρικής τριβής q_{slk} σε μη συνεκτικά εδάφη κατά DIN 4014.

δείκτης καθίζησης S/D ή S/D_F	χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής q_{bk} (MPa)*	
	για αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_{uk} (MPa)	
	0.1	0.2
0.02	0.35	0.9
0.03	0.45	1.1
$0.1=s_g$	0.8	1.5

* ενδιάμεσες τιμές θα πρέπει να υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή. Εάν ο έγχυτος πάσσαλος έχει διευρυμένη βάση, οι τιμές μειώνονται κατά 75%

Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικές τιμές αντίστασης αιχμής q_{bk} , εξαρτώμενες από το δείκτη καθίζησης s/D και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_{uk} σε συνεκτικά εδάφη κατά DIN 4014.

αντοχή συνεκτικού εδάφους όπως καθορίζεται από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_{uk} (MPa)	χαρακτηριστική οριακή πλευρική τριβή q_{sik} (MPa)*
0.025	0.025
0.1	0.04
> 0.2	0.06

* ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται από γραμμική παρεμβολή.

Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικές τιμές της οριακής πλευρικής τριβής q_{sik} σε μη συνεκτικά εδάφη κατά DIN 4014.

χαρακτηριστική μονοαξονική θλιπτική αντοχή q_{uk} (MPa)	χαρακτηριστική οριακή αντίσταση αιχμής q_{blk} (MPa)	χαρακτηριστική οριακή πλευρική τριβή q_{sik} (MPa)
0.5	1.5	0.08
5	5	0.5
20	10	0.5

* ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή

Πίνακας 2.7 Χαρακτηριστικές τιμές της οριακής αντίστασης αιχμής q_{blk} και της οριακής πλευρικής τριβής q_{sik} για πασσάλους σε βράχο DIN 4014.

2.4 Καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου

Η πρόβλεψη της καθίζησης στις πασσαλοθεμελιώσεις είναι περίπλοκη λόγω της αναταραχής και των αλλαγών στην κατάσταση της εδαφικής πίεσης ωφελουμένης στην λειτουργική εγκατάσταση, αλλά και λόγω της αβεβαιότητας για την κατανομή και την ακριβή θέση μεταφοράς του φορτίου από τον πάσσαλο στο έδαφος. Η μετατόπιση που απαιτείται για την κινητοποίηση της επιφανειακής τριβής είναι μικρή και δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 0.2 in (50mm) ανεξάρτητα από το είδος του εδάφους, τον τύπο και των διαστάσεων του πασσάλου. Ωστόσο οι Vesic(1977) και Sharma and Joshi(1988) βρήκαν ότι η τιμή αυτή μπορεί να υπερβαίνει τις 0.4 in (10mm). Η μετατόπιση που απαιτείται για την κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής του πασσάλου, είναι ωστόσο μεγάλη και εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, το είδος και τις διαστάσεις του πασσάλου. Έτσι η συνολική επιφανειακή τριβή κινητοποιείται πολύ πιο γρήγορα από την ικανότητα αιχμής. Να προσθέσουμε ακόμη ότι ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου εξαρτάται επίσης από το μήκος του πασσάλου και το επίπεδο φόρτισης.

Η προτεινόμενη από τον Vesic(1977) εκτίμηση της καθίζησης δίνεται από την σχέση 2.22 :

$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} \quad (2.22)$$

όπου S_t : η συνολική καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου

S_s : η καθίζηση λόγω της αξονικής παραμόρφωσης

S_p : η καθίζηση λόγω εδαφικής παραμόρφωσης

S_{ps} : η καθίζηση λόγω εδαφικής παραμόρφωσης στην παράπλευρη επιφάνεια

Οι τρεις συνιστώσες υπολογίζονται ξεχωριστά και μετά προστίθενται για να μας δώσουν την τελική καθίζηση.

$$S_s = (Q_{pa} + a_s Q_{fa})L / (A_p E_p) \quad (2.23)$$

όπου Q_{pa} : το φορτίο αιχμής

Q_{fa} : το φορτίο τριβής

L : το μήκος του πασσάλου

A_p : η διατομή του πασσάλου

E_p : το μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου

$$S_p = C_p Q_{pa} / (B q_p) \quad (2.24)$$

όπου Q_{pa} : το φορτίο αιχμής
 C_p : ο εμπειρικός συντελεστής
 B : η διάμετρος του πασσάλου
 q_p : η οριακή αντίσταση αιχμής

$$S_{ps} = C_s Q_{fa} / (D_f q_p) \quad (2.25)$$

όπου Q_{fa} : το φορτίο πλευρικής τριβής
 C_s : ο εμπειρικός συντελεστής
 D_f : το θαμμένο μήκος του πασσάλου
 q_p : η οριακή αντίσταση αιχμής

Ο Vesic (1977) πρότεινε ο συντελεστής a_s να έχει την τιμή 0.5 για παραβολική ή κατανομή πλευρικής τριβής, την τιμή 0.67 για τριγωνική κατανομή της πλευρικής τριβής, με μηδενική τιμή στην κεφαλή του πασσάλου και μέγιστη στον πόδα του και τέλος την τιμή 0.33 για τριγωνική κατανομή της πλευρικής τριβής, με μέγιστη τιμή στην κεφαλή του πασσάλου και μηδενική στον πόδα.

Μέθοδος των Poulos and Davis

Για τον υπολογισμό των καθιζήσεων μεμονωμένου πασσάλου οι Poulos and Davis (1980) εφαρμόζουν τη θεωρία ελαστικότητας. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική δεδομένου ότι αν και απλοποιητική δεν αφίσταται ιδιαίτερα της πραγματικότητας για τις περισσότερες των περιπτώσεων μέχρι του επιτρεπόμενου φορτίου λειτουργίας. Αντίθετα, σε περίπτωση που στόχο αποτελεί ο προσδιορισμός της απόκρισης μέχρι μεγάλων μετακινήσεων, που χαρακτηρίζουν τη φόρτιση πασσάλου μέχρι το οριακό φορτίο, η μέθοδος δεν συνίσταται και δεν προτείνεται άλλωστε και από τους ίδιους τους ερευνητές.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί σειρά νομογραφημάτων τα οποία προσδιορίστηκαν μετά από παραμετρικές επιλύσεις. Κατά τις επιλύσεις αυτές ο πάσσαλος χωρίζεται σε ομοιόμορφα φορτιζόμενα επιμέρους στοιχεία και η επίλυση πραγματοποιείται με την παραδοχή μη ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους (συμβιβαστό μετακινήσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας). Για τον υπολογισμό των μετακινήσεων χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις του Mindlin (1932). Ουσιαστική παραδοχή της μεθόδου αποτελεί επίσης η θεώρηση ομοιόμορφης κατανομής της διατμητικής τάσης κατά μήκος της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου.

Η αναμενόμενη καθίζηση προσδιορίζεται, σύμφωνα πάντα με τους Poulos and Davis (1980), από την ακόλουθη εξίσωση:

$$S = \frac{P I}{D E_s} \quad (2.26)$$

όπου S : η καθίζηση του πασσάλου

P : το εφαρμοζόμενο αξονικό φορτίο

E_s : το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

D : η διάμετρος του πασσάλου

I : διορθωτικός συντελεστής

: I_o R_k R_h R_v για πασσάλους τριβής

: I_o R_k R_b R_v για πασσάλους αιχμής

I_o : συντελεστής καθίζησης για ασυμπίεστο πάσσαλο σε άπειρο ημι-χώρο με v_s=0.5

R_k : διορθωτικός συντελεστής για τη συμπίεστικότητα του πασσάλου

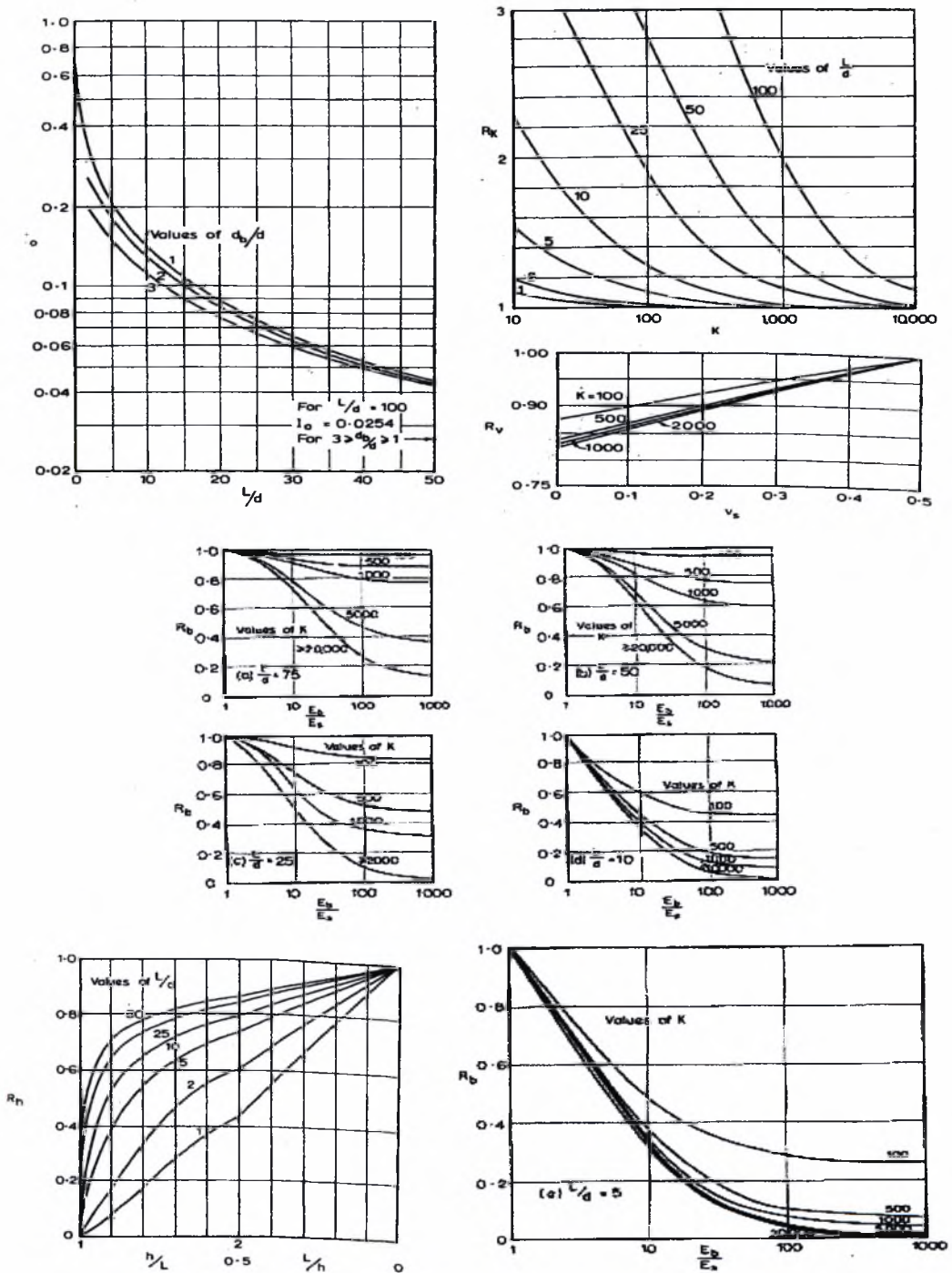
R_h : διορθωτικός συντελεστής για πεπερασμένο πάχος στρώματος το οποίο βρίσκεται πάνω σε δύσκαμπτο υπόβαθρο

R_v : διορθωτικός συντελεστής για την πραγματική τιμή του λόγου Poisson του εδάφους v_s.

R_b : διορθωτικός συντελεστής για τη δυσκαμψία του υποβάθρου

Οι τιμές των I_o, R_k, R_h, R_v, R_b δίνονται από αντίστοιχα νομογραφήματα συναρτήσεων του λόγου μήκος/διάμετρος του πασσάλου για πασσάλους τριβής ή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας του εδάφους στην αιχμή και του περιβάλλοντος εδάφους για πασσάλους αιχμής. Τα νομογραφήματα αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10

Ουσιαστικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι η εφαρμογή της προϋποθέτει ουσιαστικές απλοποιητικές παραδοχές. Ειδικότερα, η σύσταση του εδάφους πρέπει να είναι αμετάβλητη, ενώ ο πάσσαλος θα πρέπει να λειτουργεί είτε ως πάσσαλος αιχμής είτε ως πάσσαλος τριβής. Οι παραδοχές αυτές σε πολύ ειδικές συνθήκες ικανοποιούνται στην ελληνική επικράτεια και για το λόγο αυτό η μέθοδος σπάνια εφαρμόζεται.



Σχήμα 2.8 Τιμές των διορθωτικών συντελεστών για τον υπολογισμό της καθίζησης (Poulos and Davis, 1980).

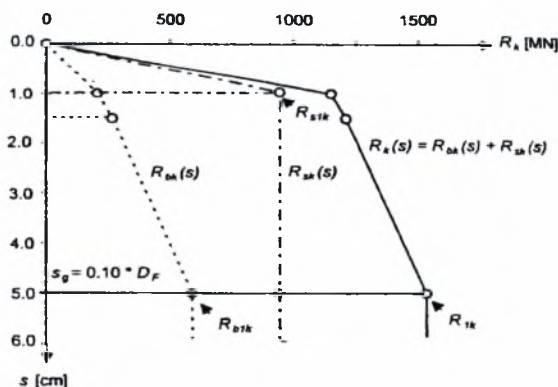
Μέθοδος DIN 4014

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης φορτίου καθίζησης το DIN 4014 χρησιμοποιεί δύο βασικές παραδοχές, οι οποίες προκύπτουν από την εμπειρία δοκιμαστικών φορτίσεων και αντανακλούν τους αναπτυσσόμενους μηχανισμούς λειτουργίας πασσάλου υπό αξονική φόρτιση. Η πρώτη κοινά αποδεκτή διαπίστωση συνίσταται στο γεγονός ότι η πλευρική αντίσταση πασσάλου εκδηλώνεται πρακτικά σε μικρές σχετικά βυθίσεις, αισθητά μικρότερες από αυτές που απαιτούνται για την πλήρη κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής. Η διαπίστωση αυτή αποτυπώνεται στην εξίσωση 2.24. Σύμφωνα με αυτήν η απαιτούμενη βύθιση για την πλήρη κινητοποίηση της πλευρικής τριβής αποτελεί συνάρτηση του μεγέθους αντίστασης, ενώ σε κάθε περίπτωση είναι μικρότερη των 3 εκατοστών.

$$S_{sg} = 0.5 R_s (MN) + 0.5 cm \leq 3 cm \quad (2.27)$$

Αντίστοιχα η πλήρης κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής απαιτεί βύθιση της τάξης του 10% της διαμέτρου του πασσάλου. Πέραν του ζεύγους τιμών στην οριακή κατάσταση αιχμής, ο γερμανικός κανονισμός προσδιορίζει δύο ακόμη ζεύγη τιμών που αντιστοιχούν σε βύθιση 2% και 3% της διαμέτρου του πασσάλου, όπως φαίνεται και από τους πίνακες 2.4 και 2.6. Κατά τον τρόπο αυτό η καμπύλη φορτίου καθίζησης κατά το DIN 4014 περιλαμβάνει τέσσερα ζεύγη σημείων, ενώ για ειδικές περιπτώσεις διαμέτρων πασσάλων (π.χ. διάμετρος 100 και 150 cm) είναι δυνατόν δύο σημεία να συμπέσουν, οπότε τα ζεύγη μειώνονται σε τρία.

Στο σχήμα 2.9 δίνεται το διάγραμμα απόκρισης φορτίου καθίζησης όπως προσδιορίσθηκε από την εφαρμογή του DIN 4014. Ο υπολογισμός αυτός δεν λαμβάνει υπόψη του ότι σε πολυστρωματικό έδαφος η οριακή πλευρική τριβή κινητοποιείται για διαφορετικές τιμές της καθίζησης της κεφαλής του πασσάλου. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορισμού της καμπύλης φορτίου καθίζησης δεν ισχύει για την περίπτωση έδρασης πασσάλου σε βραχώδες υπόβαθρο.



Σχήμα 2.9 Καμπύλη απόκρισης φορτίου καθίζησης μεμονωμένου πασσάλου κατά το γερμανικό κανονισμό DIN 4014 (Katzenbach and Moormann, 1997).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανάλυση απόκρισης ομάδας πασσάλων

3. Ανάλυση απόκρισης ομάδας πασσάλων

3.1 Γενικά

Η πλειονότητα των θεμελιώσεων με πασσάλους δεν αποτελείται από μεμονωμένους πασσάλους, αλλά από ομάδες πασσάλων, οι οποίες είναι δυνατόν να έχουν διπλό ρόλο: να ενισχύουν το έδαφος καθώς επίσης και να μεταφέρουν το εφαρμοζόμενο φορτίο σε βαθύτερα και ισχυρότερα εδαφικά στρώματα.

Η κατανομή των φορτίων της ανωδομής στα μέλη της ομάδας συναρτάται του χαρακτήρα της φόρτισης (κατακόρυφη ή πλάγια, κεντρική ή έκκεντρη, μόνιμη ή προσωρινή), της διάταξης των πασσάλων (κυρίως την μεταξύ τους απόσταση), της ακαμψίας του κεφαλόδεσμου και της φύσης του φέροντος εδάφους. Όσον αφορά την διάταξη της ομάδας των πασσάλων θα πρέπει να υπάρχει συμμετρία ώστε να αποφεύγονται καθιζήσεις, σύμπτωση του κέντρου βάρους της ομάδας με τον άξονα του επιβαλλόμενου φορτίου ώστε να αποφεύγεται η περιστροφή και να κατανέμονται ευχερέστερα τα φορτία και τέλος προνομιακή αντίσταση κατά τη διεύθυνση της επικρατούσας οριζόντιας δύναμης.

Πέραν ορισμένων ειδικών έργων οι επιμέρους πάσσαλοι ομάδας συνδέονται με ενιαίο κεφαλόδεσμο, ο οποίος μεταφέρει τα φορτία της ανωδομής στους επιμέρους πασσάλους και στο έδαφος έδρασης. Στην περίπτωση που για λόγους απλοποίησης ο κεφαλόδεσμος θεωρηθεί άκαμπτos εξασφαλίζεται κινηματικά η εξίσωση των καθιζήσεων όλων των πασσάλων, ενώ τα φορτία κατανέμονται ανάλογα με τη θέση που έχει κάθε πάσσαλος. Από δοκιμές σε φυσικά προσομοιώματα, προκύπτει ότι σε αργίλους η παρουσία του άκαμπτου κεφαλόδεσμου αυξάνει το φορτίο στους περιμετρικούς πασσάλους και μειώνει τα φορτία στους κεντρικούς πασσάλους. Στην περίπτωση εντούτοις που η δυσκαμψία του κεφαλοδέσμου δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη η κατανομή των φορτίων καθώς και η συνεισφορά του υποκείμενου εδάφους εξαρτάται καθοριστικά από τη σχετική προς το έδαφος και τους πασσάλους τιμή της δυσκαμψίας του κεφαλοδέσμου. Ο κεφαλόδεσμος είναι ενδεχόμενο να εφάπτεται στο υπέδαφος (piled group) ή όχι (free standing group), στοιχείο το οποίο επίσης διαφοροποιεί την κατανομή του φορτίου στους πασσάλους της ομάδας. Η διερεύνηση του πεδίου αυτού μπορεί να αποτελέσει συνέχεια της παρούσας ερευνητικής εργασίας και να συνεισφέρει σημαντικά στο σχεδιασμό έργων που χαρακτηρίζονται κατασκευαστικά από τα ανωτέρω χαρακτηριστικά (μπορεί ως

παράδειγμα να αναφερθεί η περίπτωση συνδυασμού γενικής κοιτόστρωσης και πασσάλων, raft foundations).

Το θέμα της απόκρισης του μεμονωμένου πασσάλου αποτέλεσε ερευνητικό πεδίο για πολλούς ερευνητές κατά τις προηγούμενες τρεις δεκαετίες. Αποτέλεσμα της ερευνητικής δραστηριότητας είναι η επαρκής, θα μπορούσε κανείς να ισχυρισθεί, κάλυψη του θέματος και της κατανόησης των αναπτυσσόμενων μηχανισμών. Τα ερωτήματα που παραμένουν αναπάντητα αναφέρονται περισσότερο σε ειδικές περιπτώσεις, όπως η απόκριση σε περίπτωση έδρασης σε βραχώδες υπόβαθρο ή ακόμη η απόκριση κατά την ανάπτυξη αρνητικών τριβών. Με εξαίρεση κατά συνέπεια των ανωτέρω ειδικών σημείων το θέμα της φέρουσας ικανότητας καθώς και της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά με σειρά μεθοδολογιών διαφορετικής προσέγγισης και ακρίβειας.

Παρά την πρόοδο που έχει επιτευχθεί ως προς την απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου, πολλά είναι τα ερωτήματα που παραμένουν αναφορικά με τη φέρουσα ικανότητα και την απόκριση ομάδας πασσάλων. Οι διάφορες μεθοδολογίες που έχουν στο παρελθόν προταθεί είναι σχετικά απλοποιητικές, η αριθμητική ανάλυση έρχεται να καλύψει τα διαθέσιμα μέσα για τη διερεύνηση του ζητήματος, ενώ η εφαρμογή δοκιμαστικών φορτίσεων είναι πρακτικά ανέφικτη σε μέγεθος πραγματικής κλίμακας.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί μειωτικοί συντελεστές σε πινακοποιημένη μορφή ή ακόμη νομογραφήματα για την αποτίμηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων, στηριζόμενοι σε απλοποιητικές παραμετρικές αναλύσεις γραμμικής ελαστικότητας και στην αρχή της επαλληλίας, Butterfield and Banerjee (1971),oulos and Davis (1980),oulos (1989). Προσέγγιση επίσης του προβλήματος βασισμένη στην μεθοδολογία (t-z) αποτελεί η πρόταση του Lee (1993), κατά την οποία προσδιορίζεται η απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου με χρήση καμπυλών προσομοίωσης (t-z) και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι λύσεις του Mindlin (1936) για τον προσδιορισμό της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων. Απλούστευση του προβλήματος αποτελεί επίσης η μεθοδολογία των Randolph and Wroth (1978), Randolph (1994) και Horikoshi and Randolph (1999) κατά την οποία η ομάδα των πασσάλων αντικαθίσταται από κάποιο ισοδύναμο φρέαρ. Οι περισσότερες από τις ανωτέρω μεθόδους προϋποθέτουν σημαντικές απλουστεύσεις. Πλεονέκτημα τους αποτελεί η αποτελεσματικότητα τους ως προς τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, με σύνοδο εντούτοις μειονέκτημα την περιορισμένη ακρίβεια σε αρκετές περιπτώσεις.

Παρά τη συνήθη θεώρηση ότι οι ομάδες πασσάλων σε αξονική απόσταση μεγαλύτερη του 3.0D, δεν επιδεικνύουν μειωτική συμπεριφορά, η πραγματική κατάσταση φαίνεται να αποτυπώνει διαφορετικά αποτελέσματα, τα οποία οδηγούν τους διάφορους κανονισμούς να αναθεωρούν τις απόψεις τους επί του θέματος. Με βάση τα αποτελέσματα τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων οι Katzenbach and

Moogmann (1997) τεκμηρίωσαν σημαντικές επιπτώσεις από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ομάδων πασσάλων σε αξονική απόσταση 3.0D, η οποία παραμένει ακόμη και όταν η απόσταση αυξάνεται σε 6.0D. Τα ευρήματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τις διατάξεις του Canadian Foundation Engineering Manual (1985), στο οποίο αναφέρεται ότι σε ομάδες πασσάλων με περισσότερους από 10 πασσάλους απαιτείται αξονική απόσταση πέραν των 7.0D ώστε οι επιμέρους πάσσалоι να επιδεικνύουν συμπεριφορά ταυτόσημη με αυτή του μεμονωμένου.

Με χρήση τριδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης οι Comodromos et al. (2003) και Comodromos (2004) έδειξαν ότι ο συντελεστής απόδοσης ομάδας φέρουσας ικανότητας δεν ξεφεύγει αισθητά από την τιμή της μονάδας και κατά συνέπεια η επίπτωση αυτή δεν είναι η πλέον σημαντική. Αντίθετα, από τις ανωτέρω αναλύσεις προέκυψε ότι η αλληλεπίδραση έχει σημαντική επίπτωση στο συντελεστή απόκρισης της ομάδας. Επιπρόσθετα έδειξαν ότι ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων επηρεάζεται όχι μόνο από τη διάταξη των πασσάλων αλλά και από το επίπεδο καθίζησης (ουσιαστικά από το συσχετιζόμενο επίπεδο φόρτισης το οποίο προκαλεί και το βαθμό πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους). Με βάση σειρά αναλύσεων προτείνεται από τον Comodromos (2004) απλοποιημένη εμπειρική σχέση με δυνατότητα πρόβλεψης, τουλάχιστον για δεδομένες εδαφικές συνθήκες, της απόκρισης διαφόρων ομάδων πασσάλων υπό την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η απόκριση μεμονωμένου πασσάλου. Η εξίσωση αυτή ισχύει για την ευρείας εφαρμογής αξονική απόσταση των 3.0D. Η ισχύς της προταθείσας εμπειρικής σχέσης εξετάστηκε και για διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς, βλ. Comodromos and Bareka (2005b), όπου τεκμηριώνεται η επιτυχής εφαρμογή της εξίσωσης σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους αργιλικών εδαφών οι οποίοι καλύπτουν εύρος από μαλακές έως σκληρές αργίλους. Η διερεύνηση της δυνατότητας ισχύος της προταθείσας εξίσωσης για περαιτέρω εδαφικούς σχηματισμούς και διατάξεις πραγματοποιήθηκε με τη διδακτορική διατριβή της Μπαρέκα Σπ. (2007), όπου και προτάθηκε τροποποίηση της σχέσης αυτής για να βρίσκει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογής. Για το σκοπό αυτό έγινε σειρά παραμετρικών αναλύσεων και αντίστοιχη επεξεργασία αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα του διδακτορικού αυτού αποτέλεσαν έναυσμα της παρούσας εργασίας για περαιτέρω διερεύνηση και συγκεκριμένα για τη συμβολή του κεφαλόδεσμου στην ανάληψη φορτίου. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες διατάξεις ομάδας για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποκρίσεων ομάδων πασσάλων με κεφαλόδεσμο και μη. Στο 4^ο κεφάλαιο φαίνεται η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων.

3.2 Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας

Η φέρουσα ικανότητα μιας ομάδας πασσάλων που αποτυγχάνει σαν ισοδύναμο βάθρου μπορεί να υπολογιστεί με ένα παρόμοιο τρόπο όπως και σ' ένα μεμονωμένο πάσσαλο, μέσω της εξίσωσης :

$$Q = Q_b + Q_s = A_b q_b + A_s \bar{\tau}_s \quad (3.1)$$

όπου,

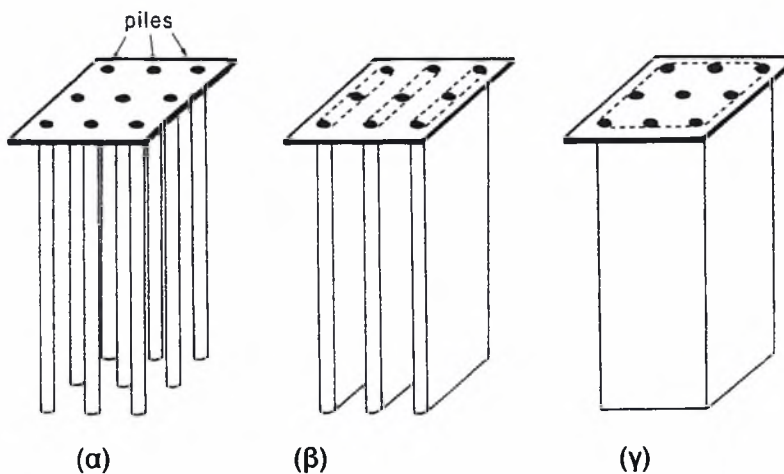
A_b : εμβαδό βάσης του βάθρου

A_s : εμβαδό της παράπλευρης επιφάνειας του βάθρου.

q_b : οριακή αντίσταση αιχμής

τ_s : διατμητική αντοχή παράπλευρης επιφάνειας

Η ανάπτυξη μηχανισμού θραύσης αυτού του τύπου μπορεί να εμφανισθεί στις περιπτώσεις πασσάλων με μικρή αξονική απόσταση και τετραγωνική διάταξη (ελάχιστη δυνατή περίμετρο). Κατά την περίπτωση αυτή το σύνολο των πασσάλων και το έδαφος που περιλαμβάνεται μεταξύ αυτών, αστοχούν μαζί ως ένα βάθρο. Η φέρουσα ικανότητα της ομάδας στην περίπτωση αυτή είναι ίση με το άθροισμα της οριακής πλευρικής αντίστασης που μπορεί να αναπτυχθεί περιμετρικά του ιδεατού βάθρου και της φέρουσας ικανότητας της βάσης του βάθρου.



Σχήμα 3.1 : Ανάπτυξη μηχανισμού θραύσης

Ο υπολογισμός της οριακής αντίστασης αιχμής q_b για την αστοχία μιας ομάδας πασσάλων σε μη συνεκτικά εδάφη ακολουθεί παρόμοια διαδικασία με αυτή που

αφορά τον μεμονωμένο πάσσαλο και σχολιάσθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, μόνο που η αντίσταση αιχμής ωφελουμένη στο ίδιο βάρος κάτω από το επίπεδο έδρασης μπορεί να μην είναι πλέον ασήμαντη. Έτσι η οριακή αντίσταση αιχμής υπολογίζεται από την σχέση :

$$q_b = N_q \sigma'_u + 0.4 \gamma B N_\gamma \quad (3.2)$$

όπου B : το πλάτος της ομάδας πασσάλων (θεωρούμενη περίπου τετράγωνο)

N_γ : συντελεστής φέρουσας ικανότητας οι τιμές του οποίου δίνονται από πίνακες (Terzaghi and Peck, 1967)

Ο μέσος όρος της αντίστασης τριβής κατά μήκος των πλευρών του βάθρου που αστοχεί μπορεί να υπολογιστεί βάση της εξίσωσης :

$$\tau_s = \sigma'_n \tan \delta = K \sigma'_u \tan \delta$$

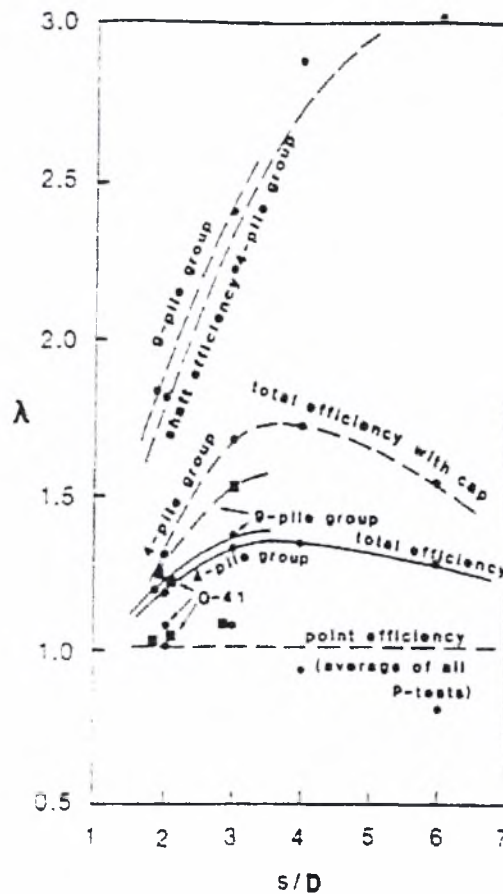
όπου τ_s : διατμητική αντοχή παράπλευρης επιφάνειας

δ : η γωνία τριβής εδάφους-πασσάλου

σ'_u : κατακόρυφη ενεργός τάση

K : συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία

Έτσι στις περισσότερες ομάδες πασσάλων σε άμμο, η υπολογιζόμενη φέρουσα ικανότητα ομάδας θα είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των ικανοτήτων των μεμονωμένων πασσάλων. Για τους εμπυγνηόμενους η ικανότητα του κάθε πασσάλου της ομάδας από μόνη της τείνει να είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι για με μεμονωμένους πασσάλους, ωφελουμένη στην επίπτωση της εγκατάστασης του. Αυτή η αύξηση της ικανότητας έχει γενικά ερμηνευθεί με όρους αποδοτικότητας ομάδας, δίνοντας στην αναλογία της ικανότητας της ομάδας στο άθροισμα των ικανοτήτων των μεμονωμένων πασσάλων θεωρώντας τους σαν απομονωμένους (Vesic, 1974, Lo, 1976). Το σχήμα 3.2 δείχνει το συντελεστή αποδοτικότητας ομάδας σύμφωνα με τον Vesic (1974). Η τιμή του λ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο κατασκευής των πασσάλων και την πυκνότητα του εδάφους. Μπορούμε να δούμε ότι η ικανότητα βάσης των πασσάλων σε ομάδα δεν επηρεάζεται από γειτονικούς πασσάλους αλλά ότι η αξονική ικανότητα μπορεί να αυξηθεί μ' έναν συντελεστή πάνω από 3.



Σχήμα 3.2 : Αποδοτικότητα 'λ' ομάδων πασσάλων σε μη-συνεκτικό έδαφος

Για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας ομάδας πασσάλων συχνά εφαρμόζεται και η προσέγγιση των Converse–La Barre, σύμφωνα με την οποία η τιμή του συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας δίνεται από την εξίσωση 3.3.

$$\eta = 1 - \left[\frac{(n_r - 1) n_p + (n_p - 1) n_r}{n_r n_p} \right] \frac{\xi}{90} \quad (3.3)$$

όπου n_r : ο αριθμός των σειρών των πασσάλων που έχει η ομάδα

n_p : ο αριθμός των πασσάλων μιας σειράς

ξ : $\arctan (D/d)$ σε μοίρες

D : η διάμετρος των πασσάλων

d : η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο διαδοχικών πασσάλων

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της προσέγγισης των Converse–La Barre οδηγεί εν γένει σε συντηρητικές τιμές συντελεστή φέρουσας ικανότητας, οι οποίοι σε κάθε περίπτωση είναι μειωτικοί.

Ακριβής προσδιορισμός της ποσοτικής αύξησης της φέρουσας ικανότητας των πασσάλων σε ομάδα είναι δύσκολη. Σαν μια συντηρητική προσέγγιση στον σχεδιασμό η αξονική αντοχή μιας ομάδας πασσάλων σε άμμο συνήθως λαμβάνεται σαν το άθροισμα των φερουσών ικανοτήτων του κάθε πασσάλου. Όταν ο κεφαλόδεσμος εδράζεται απ' ευθείας στο έδαφος τότε η ικανότητα της ομάδας θα συμπίπτει με αυτή του βάθρου. Ωστόσο, κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο σχεδιασμός της ομάδας είναι πιθανόν να εξαρτηθεί από τις πιθανές καθιζήσεις. Ο παράγοντας ασφάλειας έναντι της συνολικής αστοχίας θα είναι υψηλός και η ακριβής εκτίμηση της αντοχής της ομάδας θα είναι λιγότερο σχετική.

Για ομάδα πασσάλων σε συνεκτικά εδάφη, η φέρουσα ικανότητα της ομάδας μπορεί να υπολογιστεί παίρνοντας την οριακή αντίσταση αιχμής που δίνεται από την σχέση $q_b = N_c c_u$, με μια κατάλληλη τιμή για τον N_c και θεωρώντας ολόκληρη τη διατμητική δύναμη του εδάφους κινητοποιημένη γύρω από την περιφέρεια της ομάδας. Ο παράγοντας N_c μπορεί να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση (Skempton, 1951) από τον όρο :

$$N_c = 5(1 + 0.2B/L)[1 + I/12B] \quad (3.4)$$

όπου B : το πλάτος της ομάδας

L : το μήκος της ομάδας

I : το ενσωματωμένο μήκος του πασσάλου

Σε συνήθεις τύπους εδαφών, ειδικότερα στις ευαίσθητες αργίλους, η φέρουσα ικανότητα ενός πασσάλου ο οποίος ανήκει σε ομάδα πασσάλων με μικρή μεταξύ τους απόσταση είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του μεμονωμένου πασσάλου. Τα στοιχεία γι' αυτό είναι κατά ένα μεγάλο μέρος από τις μικρής κλίμακας πρότυπες δοκιμές. Αυτά τα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αστοχία του βάθρου της ομάδας των πασσάλων μπορεί να θεωρηθεί απίθανη όταν η απόσταση είναι λιγότερο από δύο με τρεις φορές τη διάμετρο του πασσάλου.

Με τις σύγχρονες τάσεις για τον σχεδιασμό ομάδας με μεγάλη σχετική απόσταση πασσάλων, η φέρουσα ικανότητα της ομάδας σπάνια θα διαφέρει από την τιμή που υπολογίζεται από το άθροισμα των ικανοτήτων των μεμονωμένων πασσάλων. Σύμφωνα με δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε διάταξη 3×3 ομάδας πασσάλων και σε σκληρή άργιλο (O'Neill, 1982) επιβεβαιώθηκε ότι η φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων μπορεί να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια και από το άθροισμα των ικανοτήτων των μεμονωμένων πασσάλων. Όσον αφορά τον σχεδιασμό ομάδας πασσάλων σε άμμο η μελέτη της καθιζήσης υπερισχύει έναντι αυτής της φέρουσας ικανότητας.

Συμπερασματικά λοιπόν για τον σχεδιασμό ομάδας πασσάλων πρέπει να ληφθεί υπόψη τόσο η εκτίμηση της ικανότητας των μεμονωμένων πασσάλων όσο και αυτή

του βάθρου. Γενικά η ερευνά πρέπει να βασίζεται στα αξιόπιστα δεδομένα που υπάρχουν διαθέσιμα για την ικανότητα των μεμονωμένων πασσάλων. Οι επαρκείς και ανεξάρτητοι παράγοντες της ασφάλειας πρέπει να εξασφαλίσουν κάθε τρόπο αποτυχίας.

3.3 Υπολογισμός καθίζησης ομάδας

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, οι πρόοδοι στις αναλυτικές τεχνικές όπου αφορούν κυρίως την πειραματική έρευνα έχουν συνδυαστεί έτσι ώστε να παρέχουν μια πολύ βελτιωμένη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι ομάδες πασσάλων παραμορφώνονται κάτω από φόρτιση. Η παραδοσιακή μέθοδος αντικατάστασης της ομάδας πασσάλων από μια ισοδύναμη κοιτόστρωση προκειμένου να υπολογιστούν οι καθιζήσεις, αντικαταστάθηκε από τις τεχνικές όπου η δυσκαμψία της ομάδας μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της συνδυασμένης δυσκαμψίας των μεμονωμένων πασσάλων, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων.

Η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων σύμφωνα με τον Taylor (1948) οφείλεται στην συμπίεση του πασσάλου και στη μετακίνηση των πασσάλων σχετικά με το παρακείμενο έδαφος. Όταν η επιφανειακή τριβή αναπτύσσεται πλήρως, αυτή η καθίζηση αντιστοιχεί σε αυτή που παρατηρείται σε μια δοκιμή φόρτισης μεμονωμένου πασσάλου. Καθίζηση μπορεί επίσης να παρατηρηθεί λόγω της συμπίεσης που εμφανίζεται στο έδαφος που βρίσκεται μεταξύ των πασσάλων. Τέλος η καθίζηση οφείλεται στη συμπίεση που εμφανίζεται στο έδαφος κάτω από τις αιχμές των πασσάλων.

Η καθίζηση λόγω της συμπίεσης του εδάφους μεταξύ των πασσάλων και αυτής λόγω της συμπίεσης των εδαφικών στρωμάτων κάτω από τις αιχμές του πασσάλου είναι γενικά πολύ μεγαλύτερης σπουδαιότητας από αυτό λόγω της συμπίεσης του πασσάλου και της μετακίνησης του σχετικά με το έδαφος. Ωστόσο, αυτές οι καθιζήσεις μπορούν να εμφανιστούν πολύ αργά σε κορεσμένο έδαφος λόγω της στερεοποίησης και της μικρής διάχυσης της πίεσης πόρων.

Δεδομένου ότι υπάρχει μερική διαταραχή στη δομή του εδάφους γύρω από τους πασσάλους, οι ακριβείς εκτιμήσεις του ποσοστού καθιζήσεως που εμφανίζεται κάτω από το στοιχείο δεν είναι δυνατές. Η διαταραχή της εδαφολογικής δομής κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης των πασσάλων μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των καθιζήσεων μετά από την τελική φόρτιση της πασσαλοθεμελίωσης. Είναι γνωστό ότι η αναμοχλυμένη άργιλος όταν βρίσκεται κάτω από ορισμένη φόρτιση στερεοποιείται έως ένα πολύ μικρότερο λόγο κενών από αυτόν που επιτυγχάνεται σε αδιατάρακτη κατάσταση για το ίδιο φορτίο και για την ίδια πάντα άργιλο (Taylor, 1948). Επομένως,

η δομική διαταραχή οδηγεί σε αυξανόμενες καθιζήσεις. Το μέγεθος αυτής της αύξησης της καθιζήσεως εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από παράγοντες όπως η απόσταση που η διαταραχή επεκτείνεται από τον πάσσαλο, τον τύπο του εδάφους, τον βαθμό στον οποίο το χώμα είναι διαταραγμένο και τέλος στις λεπτομέρειες της δράσης στην περίπλοκη διαδικασία σταθεροποίησης μετά από την τοποθέτηση. Η αύξηση στις καθιζήσεις δεν μπορεί να καθοριστεί ποσοτικά, αλλά είναι πιθανών ότι σε μερικά εδάφη είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι πολλοί μηχανικοί μπορούν να υποψιαστούν (Taylor, 1948). Οι εκτιμήσεις των καθιζήσεων λόγω της συμπίεσης που εμφανίζεται στο έδαφος κάτω από τις αιχμές των πασσάλων μπορούν να γίνουν με μεθόδους βασισμένες στη θεωρία σταθεροποίησης του Terzaghi.

Στις δοκιμές φορτίσεως, οι καθιζήσεις ενός μεμονωμένου πασσάλου τριβής δεν είναι αντιπροσωπευτικές για τις καθιζήσεις μιας ομάδας πασσάλων. Επομένως, τέτοιου είδους δοκιμές φορτίσεως θα δίνουν πληροφορίες για την οριακή φόρτιση παρά για τις καθιζήσεις κάτω από πραγματικές συνθήκες φορτίσεως ενός πασσάλου τριβής. Η εγκατάσταση του πασσάλου συνήθως μεταβάλλει την παραμόρφωση και τη συμπίεση της εδαφικής λειτουργίας με διαφορετικό τρόπο και με διαφορετική έκταση σε σύγκριση με το ότι γίνεται γύρω και κάτω από την αιχμή ενός μεμονωμένου πασσάλου μολονότι αυτή η επίδραση επεκτείνεται μόνο μερικές φορές όσο είναι η διάμετρος του πασσάλου.

Η ανάλυση της απόκρισης ομάδας πασσάλων έγινε εφικτή με τις αναπτυσσόμενες αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης, και συγκεκριμένα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων σε ομάδα πασσάλων έχουν περιγράψει λεπτομερώς οι *Poulos and Davis* (1980) όπου κατά την μέθοδο αυτή η τιμή της καθίζησης του μεμονωμένου πασσάλου, η οποία επαυξάνεται με χρήση συντελεστών αλληλεπίδρασης οι οποίοι δίνονται σε πίνακες ή σε νομογραφήματα. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτούνται διάφορες παραδοχές ως προς τη λειτουργία τους. Σημειώνεται ακόμη ότι, δεδομένου ότι οι προτεινόμενες τιμές προκύπτουν από γραμμική ελαστική ανάλυση, παραμένουν αμετάβλητες από το επίπεδο φόρτισης ή καθίζησης.

Για τον προσδιορισμό της καθίζησης ομάδας πασσάλων έχουν προταθεί στο παρελθόν διάφορες εμπειρικές σχέσεις των οποίων η αξιοπιστία, όπως τονίζεται συχνά και από τους ίδιους τους ερευνητές, είναι αισθητά μικρότερη από αυτήν που χαρακτηρίζει την καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου.

Ως πρώτη εμπειρική προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί η πρόταση του Skempton (1953) για πασσάλους σε άμμο, οι οποίες βασίζονται σε περιορισμένες παρατηρήσεις δοκιμών επί τόπου. Σύμφωνα με τον Skempton η καθίζηση ομάδας πασσάλων για μέσο φορτίο N_m σε άμμο, μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{S_{mG}}{S_{mLs}} = \frac{(4B+9)^2}{(B+12)^2} \quad (3.5)$$

όπου S_{mLs} : η καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου για μέσο φορτίο N_m

S_{mG} : η καθίζηση της ομάδας των πασσάλων για μέσο φορτίο N_m

B : το πλάτος της ομάδας σε ft

Για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε τετραγωνική διάταξη και σε αμμώδες έδαφος προτείνεται από τον Meyerhof (1959) η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{S_{mG}}{S_{mLs}} = \frac{s(5 - \frac{s}{3})}{(1 + \frac{1}{n_r})^2} \quad (3.6)$$

όπου s : ο λόγος της σχετικής απόστασης μεταξύ των πασσάλων προς την διάμετρο

n_r : ο αριθμός των γραμμών της τετραγωνικής ομάδας

Στην δική του προσέγγιση ο Vesic (1970) συνδέει την καθίζηση της ομάδας πασσάλων με αυτήν του μεμονωμένου δια μέσου της σχέσης:

$$S_{mG} = S_{mLs} \sqrt{\frac{B}{D}} \quad (3.7)$$

όπου B : το πλάτος της ομάδας πασσάλων

D : η διάμετρος των πασσάλων

Τέλος αναφέρεται η προσέγγιση του Meyerhof (1976) κατά την οποία η καθίζηση της ομάδας πασσάλων συνδέεται με τα αποτελέσματα του αριθμού κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείσδυσης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$S_{mG} = \frac{1}{N} (2 q I \sqrt{B}) \quad (3.8)$$

όπου N : αριθμός κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείσδυσης

q : κατακόρυφη τάση ασκούμενη στο έδαφος κάτω από τον κεφαλόδεσμο

B : το πλάτος της ομάδας πασσάλων

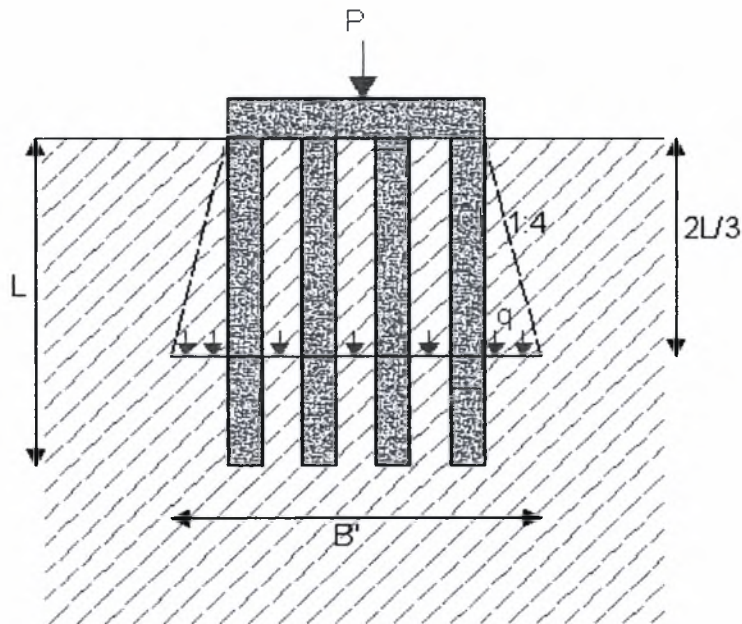
I : συντελεστής επιρροής κυμαινόμενος από 0.5 έως 1.0

Απλουστευμένη προσέγγιση εκτίμησης των καθιζήσεων ομάδας πασσάλων αποτελεί και η αναγωγή του προβλήματος σε γεωτεχνικό πρόβλημα εκτίμησης των καθιζήσεων πλάκας. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή η ομάδα πασσάλων

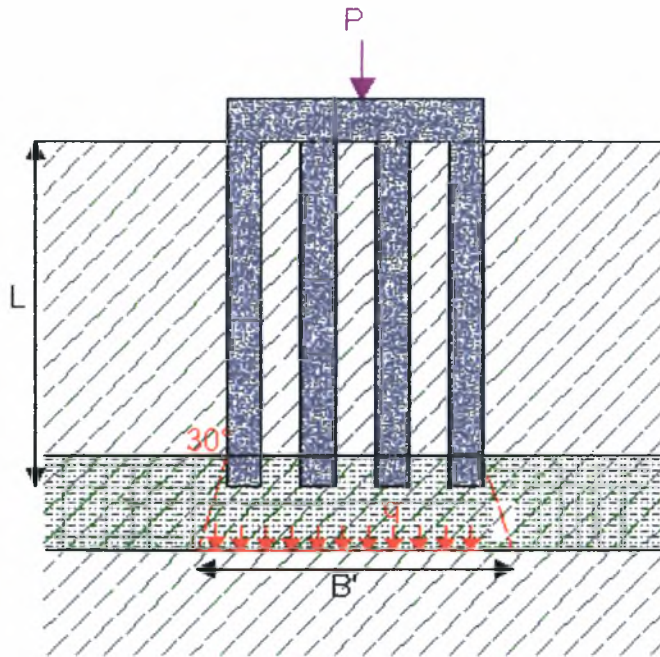
αντικαθίσταται από μία ιδεατή φορτιζόμενη πλάκα και ακολουθείται η κλασσική μέθοδος της στερεοποίησης των συνεκτικών εδαφικών στρώσεων που βρίσκονται κάτω από την πλάκα αυτή. Οι διαστάσεις της ιδεατής πλάκας και το βάθος στο οποίο θεωρείται ότι εδράζεται, καθορίζονται από τη σύσταση του εδάφους και τον τύπο των πασσάλων (διαχωρισμός σε τριβής ή αιχμής). Η απλουστευμένη αυτή προσέγγιση αποτυπώνεται στο σχήμα 3.3, το οποίο αναφέρεται στην περίπτωση πασσάλων τριβής σε συνεκτικό έδαφος, ενώ η ιδεατή πλάκα θεωρείται ότι βρίσκεται σε βάθος ίσο προς τα 2/3 του μήκους του πασσάλου. Αντίστοιχα στο σχήμα 3.4 το οποίο αναφέρεται στην περίπτωση που οι αιχμές των πασσάλων εδράζονται σε μη-συνεκτικό έδαφος, η φορτιζόμενη πλάκα θεωρείται ότι εδράζεται στην επιφάνεια του συνεκτικού εδάφους. Το ομοιόμορφο φορτίο με το οποίο φορτίζεται η ιδεατή πλάκα είναι:

$$q = \frac{P}{B_x' B_y'} \quad (3.9)$$

όπου P : το φορτίο που ασκείται στην ομάδα των πασσάλων
 B_x', B_y' : οι διαστάσεις της ιδεατής πλάκας.



Σχήμα 3.3 Κατανομή των τάσεων για τον υπολογισμό της καθίζησης στερεοποίησης σε πασσάλους τριβής



Σχήμα 3.4 Κατανομή των τάσεων για τον υπολογισμό της καθίζησης στερεοποίησης σε πασσάλους αιχμής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με ενιαίο κεφαλόδεσμο

4. Διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με ενιαίο κεφαλόδεσμο

4.1 Γενικά

Η απόκριση των θεμελιώσεων με πασσάλους σε συνθήκες κατακόρυφης ή/και οριζόντιας φόρτισης αποτέλεσε και αποτελεί σημαντικό ερευνητικό πεδίο. Το είδος της φόρτισης, στατική ή δυναμική, η συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού, γραμμική ελαστική ή μη-γραμμική, η γειτνίαση με άλλα στοιχεία θεμελίωσης, ίδιας ή διαφορετικής μορφής, αποτελούν μερικά από τα στοιχεία που συνθέτουν το δύσκολο προς ανάλυση πρόβλημα. Πρώτες προσεγγίσεις του προβλήματος αποτέλεσαν οι μέθοδοι υπολογισμού του οριακού φορτίου και του αντίστοιχου επιτρεπόμενου με εφαρμογή συντελεστή ασφαλείας. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί ουσιαστικά στον έλεγχο θραύσης του στοιχείου θεμελίωσης χωρίς να δίνει τις αναγκαίες κινηματικές πληροφορίες οι οποίες επηρεάζουν την απόκριση και τυχόν ανάπτυξη καταναγκασμών στην ανωδομή. Για το λόγο αυτό, ακόμα και την εποχή που οι υπολογιστικές μέθοδοι δεν ήταν σε θέση να δώσουν τις ανωτέρω πληροφορίες, η αναγκαιότητα γνώσης τους οδήγησε στη διεξαγωγή δοκιμαστικών φορτίσεων. Το υπερβολικό εντούτοις κόστος διεξαγωγής δοκιμαστικών φορτίσεων περιόρισε την εκτέλεση τους μόνο σε ιδιαίτερης σημασίας έργα εδραζόμενα σε προβληματικά εδάφη.

Η επιστημονική πρόοδος και η συσσωρευμένη εμπειρία οδήγησαν στη βελτίωση των μεθόδων προσέγγισης του προβλήματος με τη διατύπωση, κατά το τέλος της δεκαετίας 1960 και τις αρχές της επόμενης δεκαετίας, μεθοδολογιών ικανών να προβλέψουν την κινηματική και εντατική κατάσταση πασσάλου υπό κατακόρυφη φόρτιση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εμπειρικής προσέγγισης αποτελεί ο γερμανικός κανονισμός DIN 4014. Αντίστοιχο παράδειγμα αριθμητικής προσέγγισης αποτελεί η μεθοδολογία p - z . Κατά τη μέθοδο αυτή η αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους προσομοιώνεται με ελατηριακές σταθερές, η δυσκαμψία των οποίων θεωρήθηκε σταθερή αρχικά, ενώ στη συνέχεια αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι μη γραμμικής ανάλυσης ικανοί να ενσωματώσουν ελατήρια με μη-γραμμική συμπεριφορά. Η ευρεία χρήση των ανωτέρω προσεγγίσεων σε συνδυασμό με την ευρεία εμπειρία που αποκτήθηκε από την διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων τις κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμες και αξιόπιστες. Τα αποτελέσματα των ανωτέρω μεθοδολογιών χρησιμοποιούνται και για τον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων με την εισαγωγή συντελεστών αποτίμησης της αλληλεπίδρασης. Ο

προσδιορισμός της τιμής των συντελεστών αυτών μπορεί να εφαρμοσθεί για γραμμική ελαστική ανάλυση, ενώ προϋποθέτει κανονικοποιημένη διάταξη, υπέδαφος ενιαίας στρωματογραφίας, διαχωρισμό σε πασσάλους αιχμής ή τριβής και σειρά άλλων περιορισμών που καθιστούν την απλοποιητική αυτή προσέγγιση υπό όρους και μόνο αποτελεσματική και εφαρμόσιμη.

Η περαιτέρω εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων επέτρεψε τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και των Πεπερασμένων Διαφορών για την προσέγγιση του προβλήματος. Πρόκειται για μεθόδους ιδιαίτερα σύνθετες σε σχέση με τις απλές προγραμματιστικά υπορουτίνες της μεθόδου p - z με αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και εν γένει μη-γραμμικό προγραμματισμό. Ειδικότερα οι αριθμητικές μέθοδοι καλύπτουν πλέον συμπληρωματικά δύο ουσιαστικά κενά που άφηναν πρακτικά ανέπαφα οι αρχικές μεθοδολογίες προσέγγισης και επίλυσης του προβλήματος. Το πρώτο αφορά στην εντατική και κινηματική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους, όπου και όταν οι πληροφορίες αυτές κρίνονται αναγκαίες. Το δεύτερο αναφέρεται στον ακριβή προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων, πεδίο με αυξημένο ενδιαφέρον για τις θεμελιώσεις με πασσάλους τόσο σε πλευρική όσο και σε αξονική φόρτιση, και τη μεταβολή της συναρτήσεως του εύρους της καθίζησης.

Πέραν ορισμένων ειδικών έργων οι επιμέρους πάσσαλοι ομάδας συνδέονται με ενιαίο κεφαλόδεσμο, ο οποίος μεταφέρει τα φορτία της ανωδομής στους επιμέρους πασσάλους και στο έδαφος έδρασης. Στην περίπτωση που για λόγους απλοποίησης ο κεφαλόδεσμος θεωρηθεί άκαμπτos εξασφαλίζεται κινηματικά η εξίσωση των καθιζήσεων όλων των πασσάλων. Εάν η δυσκαμψία του κεφαλοδέσμου δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη η κατανομή των φορτίων καθώς και η συνεισφορά του υποκείμενου εδάφους εξαρτάται καθοριστικά από τη σχετική προς το έδαφος και τους πασσάλους τιμή της δυσκαμψίας του κεφαλοδέσμου.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται απόπειρα διερεύνησης της απόκρισης ομάδας πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση και της επιρροής του κεφαλόδεσμου τόσο στη φέρουσα ικανότητα της ομάδας των πασσάλων όσο και στην κατανομή του φορτίου στους επιμέρους πασσάλους. Για την επίτευξη του στόχου πραγματοποιείται αποτίμηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης των πασσάλων κάνοντας παραμετρική ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$. Το ενδιαφέρον εστιάζεται ιδιαίτερα στη δυσκαμψία της ομάδας πασσάλων, που συνήθως αποτελεί το πιο ενδιαφέρον στοιχείο για την προσομοίωση της απόκρισης των πασσαλοθεμελίσεων με καθοριστικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό της προς θεμελίωση ανωδομής.

4.2 Αριθμητική ανάλυση

Για τις τριδιάστατες μη-γραμμικές επιλύσεις χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC^{3D}. Ειδικότερα για την προσομοίωση της απόκρισης του εδάφους χρησιμοποιείται ο καταστατικός νόμος συμπεριφοράς Mohr-Coulomb, ο οποίος στην ειδική περίπτωση των αργιλικών εδαφών μεταπίπτει στο νόμο Tresca. Δεδομένου ότι ο νόμος αυτός τυγχάνει ευρείας εφαρμογής για την προσομοίωση εδαφικών υλικών και παρουσιάζεται εκτενώς από διάφορους ερευνητές δεν θεωρείται απαραίτητη η περαιτέρω επεξήγηση του καταστατικού αυτού νόμου. Ο αναγνώστης μπορεί να προσφύγει σε διάφορα βιβλία όπου περιγράφεται το κριτήριο αυτό, χαρακτηριστικά δε αναφέρονται τα συγγράμματα των Chen (1982), Chen and Baladi (1986), Desai and Christian (1977), Owen and Hinton (1980), Κωμοδρόμος (2001).

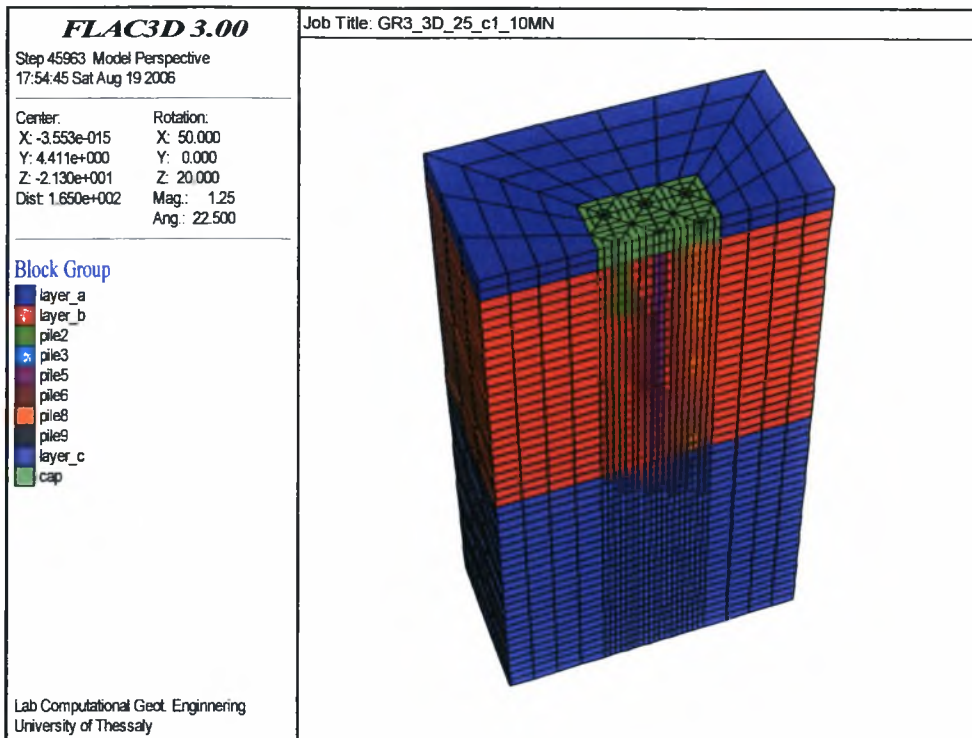
Ο κάνναβος πεπερασμένων διαφορών κατά τις επιλύσεις ήταν ιδιαίτερα πυκνός στα όρια των πασσάλων, το δε μέγεθος των στοιχείων αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο όσο απομακρύνεται κανείς από τα όρια αυτά προκειμένου να μην επιβαρύνεται η υπολογιστική διαδικασία. Τα όρια κάθε προβλήματος, τόσο πλευρικά όσο και σε βάθος, βρίσκονται αρκετά απομακρυσμένα από τα στοιχεία των πασσάλων προκειμένου να αποφευχθούν αριθμητικά λάθη από τις οριακές συνθήκες στις θέσεις αυτές. Στη βάση κάθε καννάβου επίλυσης δεσμεύονται όλες οι μετακινήσεις, ενώ πλευρικά επιτρέπονται οι μετακινήσεις μέσα στο επίπεδο του ορίου και δεσμεύονται οι μετακινήσεις εκτός από αυτό. Το γεωμετρικό μέγεθος του χώρου ανάλυσης καθώς και ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων του προβλήματος μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος και τον αριθμό των πασσάλων, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή ακρίβεια. Δεδομένου ότι η προετοιμασία καννάβου τριδιάστατης ανάλυσης αποτελεί από μόνη της ιδιαίτερα κοπιαστική εργασία χρησιμοποιήθηκαν ειδικές υπορουτίνες αυτόματης προετοιμασίας πλέγματος στοιχείων οι οποίες είχαν ήδη ετοιμασθεί από προηγούμενες εργασίες (Comodromos et al., 2003; Comodromos, 2004).

Κατά την ανάλυση εξετάστηκαν επτά διαφορετικά εδαφικά υλικά. Τα τέσσερα πρώτα αφορούν σε συνεκτικά εδάφη και αντιστοιχούν σε μαλακή, μέσης συνεκτικότητας, στιφρή και πολύ στιφρή έως σκληρή άργιλο και συμβολίζονται ως C1, C2, C3, C4 αντίστοιχα. Στη συνέχεια εξετάστηκαν τρεις κατηγορίες μη-συνεκτικών εδαφών τα οποία αντιστοιχούν σε χαλαρή, μέτριας πυκνότητας και πολύ πυκνή άμμο με την κωδικοποιημένη ονομασία S1, S2 και S3. Ο πίνακας 4.1 συνοψίζει τις ιδιότητες των επτά εδαφικών κατηγοριών.

	C1	C2	C3	C4	S1	S2	S3
Μέτρο του Young E (MPa)	5	10	30	40	15	30	80
Λόγος Poisson ν	0,4	0,35	0,32	0,3	0,25	0,3	0,35
Αστράγγιστη Διατμητική αντοχή c_u (kPa)	25	50	100	150			
Συνάφεια εδάφους – πασσάλου στη διεπιφάνεια c_a (kPa)	25	50	72	75			
Γωνία τριβής (deg)					30	35	40
Γωνία τριβής στη διεπιφάνεια (deg)					28	31	35
Φαινόμενο βάρος γ (kN/m ³)	20	20	20	20	20	20	20

Πίνακας 4.1 Παράμετροι και ιδιότητες των επτά εδαφικών τύπων που χρησιμοποιήθηκαν.

Για τις κατηγορίες αυτές εξετάζονται διατάξεις 3*3 με αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3.0D και 5.0D και 5*5 με αξονική απόσταση 3.0D. Για όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις πραγματοποιούνται επιλύσεις για σχετικό μήκος πασσάλων $L/D=25$ ενώ σε όλες τις αναλύσεις υιοθετείται διάμετρος πασσάλων ίση με 1.0 m. Ο κεφαλόδεσμος έχει πάχος 2 m και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του είναι όμοια με αυτά των πασσάλων. Η διαδικασία προσομοίωσης είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε στις μέχρι τώρα αναλύσεις ομάδων πασσάλων. Η συμπεριφορά των πασσάλων θεωρείται σε όλες τις επιλύσεις ως γραμμική ελαστική με λόγο Poisson $\nu=0.2$ και μέτρο ελαστικότητας $E=42000$ MPa (η τιμή αυτή περιλαμβάνει και την αύξηση λόγω της παρουσίας των ράβδων χάλυβα). Στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται ο κάναβος πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ομάδας πασσάλων σε διάταξη 3*3 με σχετική απόσταση 3.0D, με ανηγμένο μήκος πασσάλων $L/D=25$ m.

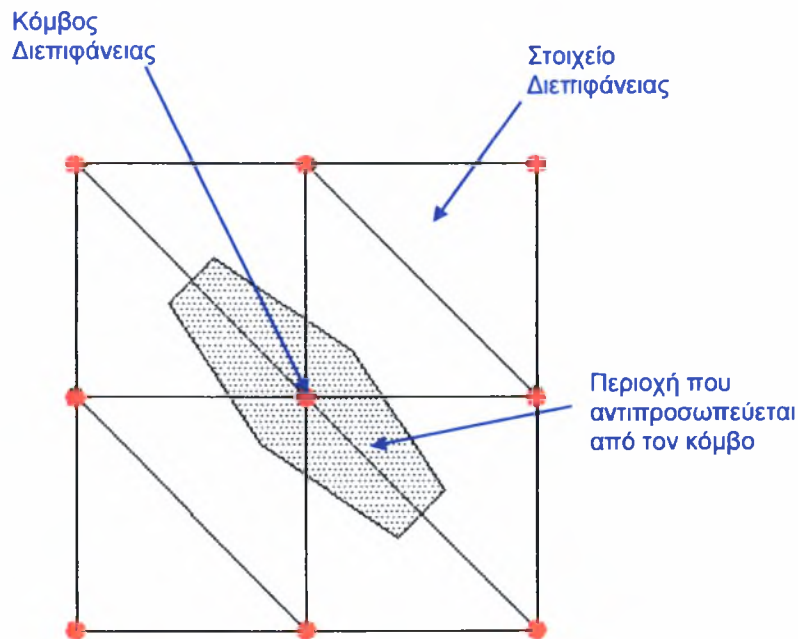


Σχήμα 4.1 Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών ομάδας πασσάλων σε διάταξη 3*3 και σχετικής απόστασης 3.0D, με ανηγμένο μήκος πασσάλων $L/D=25$ m, σε τομή $y=0$.

Δεδομένου ότι, με εξαίρεση τις μαλακές αργίλους, η διατμητική αντίσταση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου είναι κατά κανόνα μικρότερη από αυτήν που διέπει το εδαφικό υλικό, χρησιμοποιούνται στοιχεία διεπιφανειών ανάμεσα στα στοιχεία των πασσάλων και του περιβάλλοντος εδάφους. Τα στοιχεία διεπιφανειών που διαθέτει ο κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών $FLAC^{3D}$ έχουν ιδιότητες τριβής, συνοχής, διαστολής, ορθής και διατμητικής δυσκαμψίας, εφελκυστικής και διατμητικής αντοχής. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται με κάθε γειτνιάζουσα ζώνη με δύο τριγωνικά στοιχεία διεπιφανειών. Οι κόμβοι τους ορίζονται αυτόματα στην κορυφή κάθε στοιχείου της διεπιφάνειας. Όταν κάποια άλλη επιφάνεια του καννάβου έρθει σε επαφή με το στοιχείο της διεπιφάνειας, η επαφή ανιχνεύεται από τον κόμβο της διεπιφάνειας και χαρακτηρίζεται από ορθή και διατμητική δυσκαμψία καθώς και από τις εκάστοτε ιδιότητες ολίσθησης. Κάθε στοιχείο της διεπιφάνειας κατανέμει την περιοχή του στους κόμβους του με έναν κεντροβαρικό τρόπο. Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο ολόκληρη η διεπιφάνεια διαιρείται σε ενεργούς κόμβους οι οποίοι αντιπροσωπεύουν ολόκληρη την επιφάνεια της διεπιφάνειας. Το σχήμα 4.3 απεικονίζει τη σχέση ανάμεσα στα στοιχεία της διεπιφάνειας και τους κόμβους αυτής, και την περιοχή που αντιπροσωπεύεται από κάθε κόμβο. Κατά τη διάρκεια κάθε 'χρονικού' βήματος επίλυσης, υπολογίζεται η απόλυτη ορθή δειξιδυση και η διατμητική παραμόρφωση για κάθε κόμβο διεπιφάνειας και για το αντίστοιχο μέτωπο

στόχου. Οι δύο αυτές τιμές χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τον καταστατικό νόμο των διεπιφανειών για τον υπολογισμό της ορθής δύναμης και του διανύσματος της διατμητικής δύναμης.

Ο καταστατικός νόμος των στοιχείων των διεπιφανειών διέπεται από το μονοδιάστατο γραμμικό κριτήριο διατμητικής αντοχής του Coulomb, εξίσωση 4.2. Στην ίδια εξίσωση περιλαμβάνεται και η γωνία διαστολής της διεπιφάνειας, η οποία πέραν των κινηματικών μεγεθών τα οποία επηρεάζει, προκαλεί και αύξηση των ενεργών ορθών δυνάμεων στο μέτωπο της διεπιφάνειας. Στο σχήμα 4.2 δίνεται σχηματικά το μαθηματικό προσομοίωμα του στοιχείου διεπιφάνειας του FLAC^{3D}. Τα στοιχεία των διεπιφανειών διαχωρίζονται όταν αναπτυχθεί δύναμη ελκυσμού ίση με την εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται κενό ανάμεσα στο έδαφος και τον πάσσαλο και κατά συνέπεια οι διατμητικές και ορθές δυνάμεις μηδενίζονται (πλήρης αποκόλληση εδάφους πασσάλου).



Σχήμα 4.2 Κατανομή της περιοχής που αντιπροσωπεύει κάθε κόμβος διεπιφάνειας.

$$\tau_{\alpha} = c_i + \sigma'_n \tan \delta \quad (4.2)$$

όπου τ_{α} : οριακή διατμητική τάση στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου.

c_i : συνάφεια μεταξύ εδάφους και πασσάλου.

δ : γωνία τριβής μεταξύ εδάφους και πασσάλου.

σ'_n : ενεργή ορθή τάση στην επιφάνεια του πασσάλου.

Οι ορθές και διατμητικές τάσεις καθορίζονται από τις εξισώσεις (4.3) και (4.4)

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A \quad (4.3)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + K_s \Delta v_{si}^{(t+0.5\Delta t)} A \quad (4.4)$$

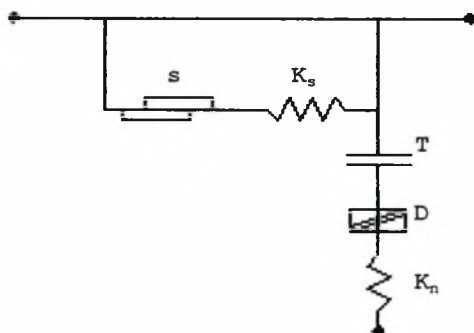
όπου F_n , F_{si} : ορθή και διατμητική τάση αντίστοιχα.

K_n , K_s : ορθή και διατμητική δυσκαμψία αντίστοιχα.

A : περιοχή που σχετίζεται με τον αντίστοιχο κόμβο διεπιφάνειας.

Δv_{si} : διάνυσμα σχετικής διατμητικής μετατόπισης.

u_n : απόλυτη τιμή της διείσδυσης του κόμβου της διεπιφάνειας στο μέτωπο.



Σχήμα 4.3 Παράμετροι καταστατικού νόμου των διεπιφανειών στο FLAC^{3D}.

S : ολίσθηση

T : εφελκυστική αντοχή

D : γωνία διαστολής

K_s : διατμητική δυσκαμψία

K_n : ορθή δυσκαμψία

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των στοιχείων διεπιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν οι προτάσεις διαφόρων ερευνητών. Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο κεφάλαιο 2 η τιμή της συνάφειας μεταξύ πασσάλου και εδάφους μπορεί να ληφθεί ίση με τη συνοχή του εδάφους για μαλακές αργίλους, ενώ για πιο σκληρές αργίλους θα πρέπει να εφαρμόζεται ένας μειωτικός συντελεστής στη συνοχή του εδάφους (Tomlinson, 1970; Din 4014, 1990). Μετά από επεξεργασία των διαφόρων προτάσεων επιλέχθηκαν για κάθε κατηγορία αργιλικού εδάφους οι προτεινόμενες στον πίνακα 4.1 τιμές. Αντίστοιχα στις άμμους η γωνία τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου εδάφους αντιστοιχεί στην κρίσιμη κατάσταση και είναι μειωμένη σε σχέση με τη γωνία τριβής του περιβάλλοντος εδάφους (Ostigao, 1995). Οι τιμές αυτές εφαρμόζονται σε όλες τις ομάδες πασσάλων και στο μεμονωμένο πάσσαλο κάθε κατηγορίας εδάφους. Σημειώνεται τέλος ότι οι σταθερές προσομοίωσης της δυσκαμψίας λαμβάνονται μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το

εδαφικό υλικό τουλάχιστον, ώστε να αποφευχθεί η πρόσδοση πρόσθετης παραμόρφωσης από τη διεπιφάνεια.

Η διαδικασία προσομοίωσης περιλαμβάνει το αρχικό βήμα δημιουργίας του καννάβου προσομοίωσης και απόδοσης των παραμέτρων των υλικών. Στη συνέχεια ακολουθεί η πρώτη επίλυση κατά την οποία εισάγεται το αρχικό εντατικό πεδίο. Ακολουθεί η επιβολή του φορτίου και η επίλυση.

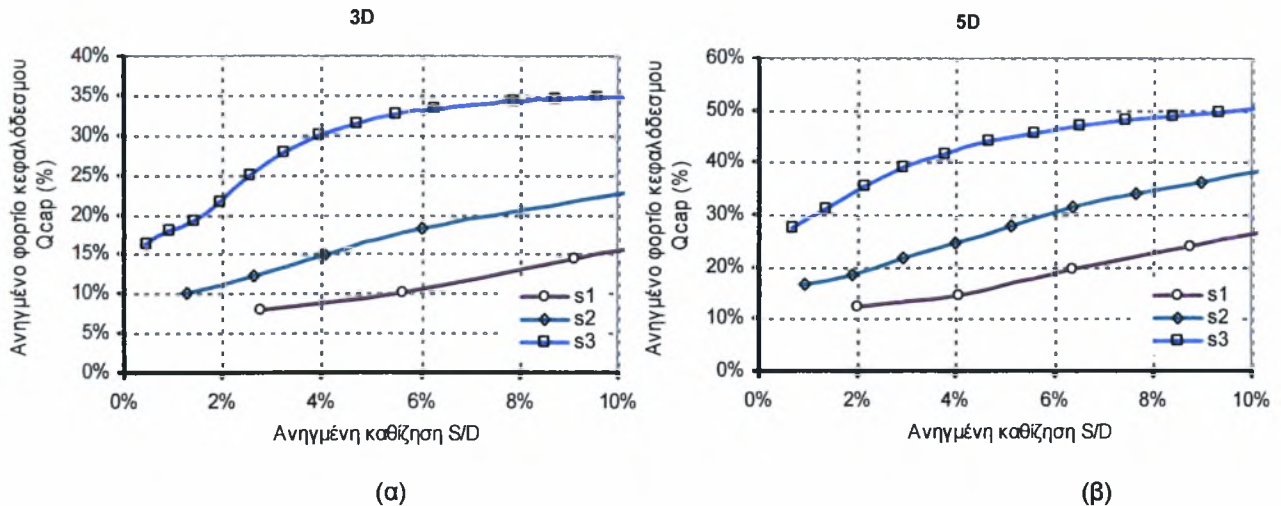
Για την επίλυση του προβλήματος του μεμονωμένου πασσάλου για οκτώ στάδια επιβολής του φορτίου ο απαιτούμενος χρόνος επίλυσης κυμαίνεται από 3 έως 24 ώρες σε υπολογιστή Pentium IV με ταχύτητα επεξεργαστή 1900 MHz. Σημειώνεται ότι η τιμή αυτή είναι δυνατόν να αυξηθεί πολύ περισσότερο σε περίπτωση που καθορισθεί ιδιαίτερα υψηλό κριτήριο σύγκλισης ή εν γένει καθορισθεί πλαίσιο ανάλυσης που επιβραδύνει την επίτευξη σύγκλισης. Ο αντίστοιχος χρόνος για ομάδες πασσάλων κυμαίνεται από μία έως και 14 ημέρες.

Η διαχείριση των αποτελεσμάτων των ανωτέρω επιλύσεων αποτελεί και αυτή από μόνη της ένα ιδιαίτερα κοπιαστικό έργο. Για την ανάκληση των τιμών των παραμέτρων ενδιαφέροντος (μετακινήσεις και τάσεις στους πασσάλους) χρησιμοποιήθηκαν και πάλιν ειδικές υπορουτίνες, οι οποίες δημιουργούν κατάλληλα αρχεία με πινακοποιημένες τιμές, οι οποίες εισάγονται στη συνέχεια με αυτοματοποιημένη διαδικασία στο πρόγραμμα MS EXCEL.

4.3 Απόκριση ομάδας πασσάλων σε αμμόδες έδαφος

Οι επιλύσεις για ομάδα πασσάλων με κεφαλόδεσμο πραγματοποιούνται για τις τρεις κατηγορίες αμμοδών εδαφών των οποίων τα χαρακτηριστικά δίνονται στον πίνακα 4.1. Στις τρεις αυτές κατηγορίες αντιστοιχεί σειρά αναλύσεων για ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3.0D και 5.0D. Οι επιλύσεις πραγματοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης με τις αντίστοιχες ομάδες πασσάλων χωρίς κεφαλόδεσμο, (Μπαρέκα Σπ. 2007) έτσι ώστε να είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της παρουσίας του κεφαλόδεσμου.

Στο σχήμα 4.4 δίνεται η κατανομή του ποσοστού του επιβαλλόμενου φορτίου που φέρεται από τον κεφαλόδεσμο και επομένως γίνεται σαφής η επίδραση της παρουσίας του για τη διάταξη 3*3. Το ποσοστό αυτό αυξάνει για όλες τις εξετασθείσες διατάξεις με την αύξηση του ποσοστού καθίζησης και με την αύξηση της σχετικής απόστασης των πασσάλων μελών της ομάδας. Η αντίσταση αιχμής, που είναι και ο κύριος μηχανισμός ανάληψης φορτίου του κεφαλόδεσμου, κινητοποιείται σε πολύ μεγαλύτερες καθιζήσεις από την αντίσταση τριβής και επομένως όσο αυξάνονται οι καθιζήσεις το ποσοστό ανάληψης του φορτίου από την επιφανειακή θεμελίωση μεγαλώνει.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα μεταβολής του ανηγμένου φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος συναρτήσει της καθίζησης για τις διάφορες κατηγορίες άμμου και για διάταξη πασσάλων 3*3 σε απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.

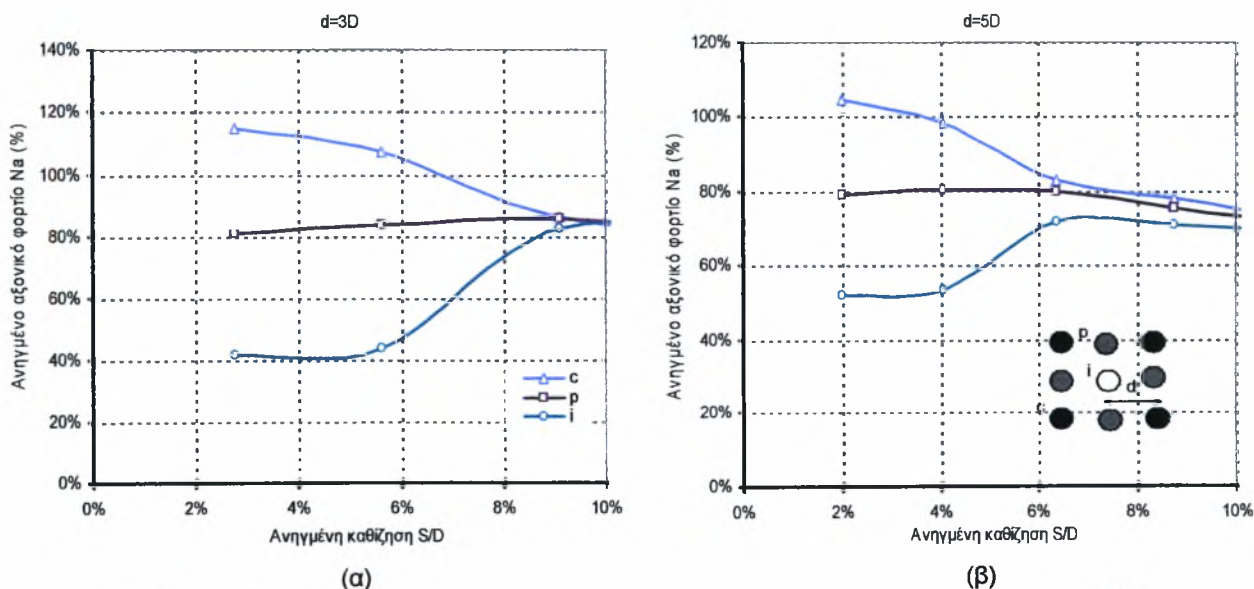
Για την περίπτωση της χαλαρής άμμου και για σχετική απόσταση 3D το ποσοστό του φορτίου που αναλαμβάνει ο κεφαλόδεσμος είναι 8% του επιβαλλόμενου για καθιζήσεις που προκαλούνται από το φορτίο λειτουργίας ενώ αυξάνει στο 15% στο οριακό φορτίο. Για τον ίδιο τύπο άμμου η αύξηση της αξονικής απόστασης επιφέρει αύξηση των ποσοστών αυτών από 12-28% αντίστοιχα. Τα ποσοστά αυτά αυξάνονται σημαντικά όσο αυξάνεται η πυκνότητα της άμμου. Ειδικότερα στην περίπτωση της πολύ πυκνής άμμου ο κεφαλόδεσμος παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ανάληψη φορτίου. Για αξονική απόσταση 3D, 20% του φορτίου αναλαμβάνεται από την επιφανειακή θεμελίωση στην κατάσταση λειτουργίας και αντίστοιχα 35% στην κατάσταση αστοχίας. Το τελευταίο ποσοστό φτάνει στο 50% όταν η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων γίνεται 5D. Το επιβαλλόμενο φορτίο επομένως σε αυτή την περίπτωση ισομοιράζεται μεταξύ βαθείας και επιφανειακής θεμελίωσης.

Στο σχήμα 4.5 δίνεται η κατανομή του φορτίου για έδαφος τύπου S1, στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της διάταξης 3*3, με σχετικό μήκος $L/D=25$ και αποστάσεις 3.0D και 5.0D. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ο κεντρικός πάσσαλος, i , αναλαμβάνει πολύ μικρότερο φορτίο από τους υπόλοιπους. Ειδικότερα ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει φορτίο της τάξης του 40% του μέσου φορτίου στην περίπτωση ομάδας με σχετική αξονική απόσταση 3.0D. Όταν η αξονική απόσταση αυξάνεται σε 5.0D το ποσοστό αυτό αυξάνεται σε 58% του μέσου φορτίου, γεγονός που καταδεικνύει την ευεργετική δράση της αύξησης της αξονικής απόστασης στην ομοιομορφοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου στους επιμέρους πασσάλους. Αντίθετα ο γωνιακός πάσσαλος επιβαρύνεται με φορτίο 40% μεγαλύτερο του μέσου. Η σύγκριση της απόκρισης του κεντρικού με το γωνιακό πάσσαλο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για επίπεδο καθίζησης 3%D, το οποίο πρακτικά αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο ο γωνιακός πάσσαλος επιδεικνύει

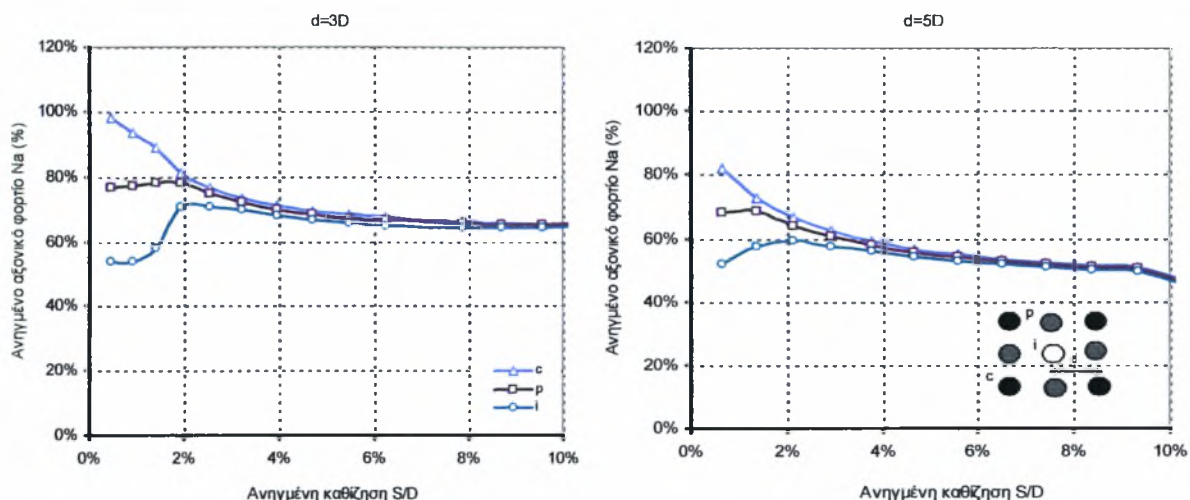
τριπλάσια δυσκαμψία από τον κεντρικό. Η διαφορά αυτή μειώνεται αυξανόμενης της καθίζησης, ενώ όταν αυξηθεί και η αξονική απόσταση επέρχεται πλήρης ομοιομορφοποίηση της κατανομής για καθίζηση της τάξης του 10% ή και μικρότερη σε περίπτωση μεγάλων αξονικών αποστάσεων (σχήμα 4.1 για αξονική απόσταση 5.0D).

Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τις ενδιάμεσες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων για την ίδια πάντα κατηγορία εδάφους. Η αύξηση της πυκνότητας της άμμου οδηγεί σε συνεχή μείωση της απόκλισης απόκρισης των δύο αυτών χαρακτηριστικών πασσάλων. Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η κατανομή του φορτίου για έδαφος τύπου S3. Παρατηρείται ότι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων είναι ιδιαίτερα μικρές και οι πάσσαλοι επιδεικνύουν πρακτικά την ίδια συμπεριφορά ανεξάρτητα από τη θέση που καταλαμβάνουν στην ομάδα. Η αύξηση της αξονικής απόστασης των πασσάλων οδηγεί και για την περίπτωση των πυκνών άμμων στο ίδιο με την κατηγορία S1 ευεργέτημα ομοιομορφοποίησης της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο σχήμα 4.2.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκλιση των διαγραμμάτων δεν γίνεται στο 100% του αναλαμβανόμενου φορτίου αλλά σε μικρότερο ποσοστό, το οποίο αντιστοιχεί στο ποσοστό του συνολικά επιβαλλομένου φορτίου που αναλαμβάνεται από την ομάδα των πασσάλων, ενώ το υπολειπόμενο ποσοστό είναι αυτό που συμβάλει ο κεφαλόδεσμος όπως παρουσιάσθηκε αναλυτικότερα πιο πάνω.

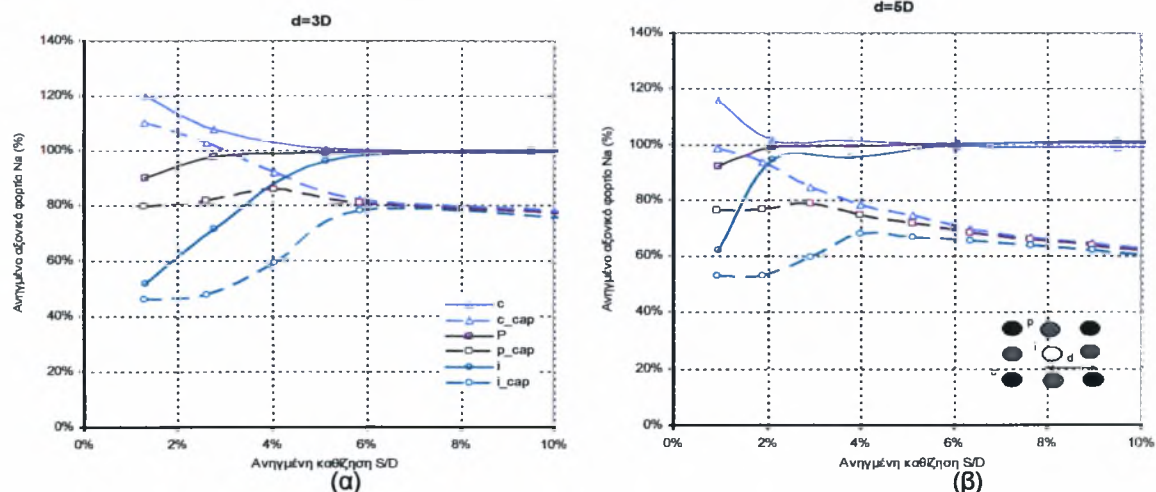


Σχήμα 4.5 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο, κατηγορία εδάφους S1 και σχετική απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.



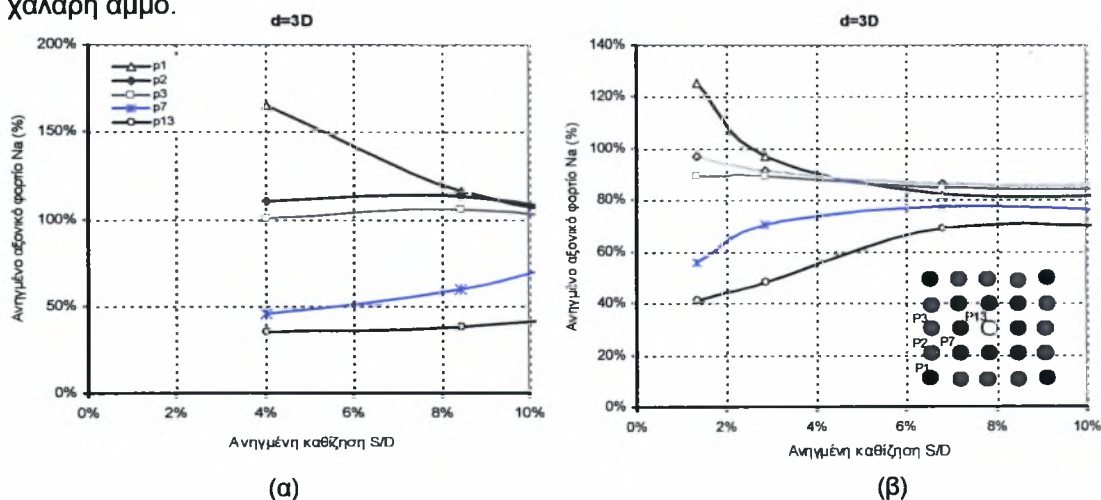
(α) (β)
 Σχήμα 4.6 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο, κατηγορία εδάφους S3 και σχετική απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζονται η σύγκριση των αποτελεσμάτων ομάδας σε διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο και μη, σχετικό μήκος πασσάλων $L/D=25$, κατηγορία εδάφους μέσης πυκνότητας S2 και αξονικές αποστάσεις 3.0D και 5.0D. Δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση των αποκρίσεων στις δύο περιπτώσεις. Όπως και στην περίπτωση ομάδας με κεφαλόδεσμο ο γωνιακός πάσσαλος εμφανίζει τριπλάσια δυσκαμψία από τον κεντρικό. Ωστόσο αυτό που αξίζει να παρατηρηθεί είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση με τον κεφαλόδεσμο οι χαρακτηριστικοί πάσσαλοι παρουσιάζουν μικρότερη δυσκαμψία καθώς ένα μέρος του φορτίου φέρεται από τον κεφαλόδεσμο ενώ η σύγκλιση των αποκρίσεων των διάφορων πασσάλων της ομάδας επέρχεται σε μεγαλύτερο ποσοστό καθίζησης για τις ομάδες με κεφαλόδεσμο. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι εφόσον οι πάσσαλοι αναλαμβάνουν μικρότερο φορτίο υπάρχει υστέρηση στην πλαστικοποίηση του εδάφους σε σχέση με τις αντίστοιχες ομάδες πασσάλων χωρίς την παρουσία του στοιχείου του κεφαλόδεσμου.



Σχήμα 4.7 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο και μη, κατηγορία εδάφους S2 και σχετική απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.

Ανάλογα αποτελέσματα ισχύουν και για τη διάταξη 5*5. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους πέντε χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας, με σχετικό μήκος $L/D=25$ και κατηγορία εδάφους S1 και S3. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ο κεντρικός πάσσαλος P13 αναλαμβάνει πολύ μικρότερο φορτίο από τους υπόλοιπους. Ειδικότερα στην περίπτωση της χαλαρής άμμου αναλαμβάνει φορτίο της τάξεως του 37-45% του μέσου φορτίου ενώ για την πυκνή άμμο το ποσοστό αυτό φτάνει στο 40-70%. Αντίθετα η σύγκριση των γωνιακών πασσάλων για τις δύο κατηγορίες εδάφους μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση της χαλαρής άμμου ο γωνιακός πάσσαλος είναι πιο δύσκαμπτος αφού αναλαμβάνει φορτίο της τάξεως του 170% του μέσου φορτίου έναντι του γωνιακού στην περίπτωση της πυκνής άμμου που φτάνει στο 125% για μικρά επίπεδα καθίζησης. Τέλος προκύπτει το συμπέρασμα ότι στη πυκνή άμμο επέρχεται αρκετά γρήγορα ομοιομορφιοποίηση της απόκρισης κάτι που δεν παρατηρείτε στη χαλαρή άμμο.



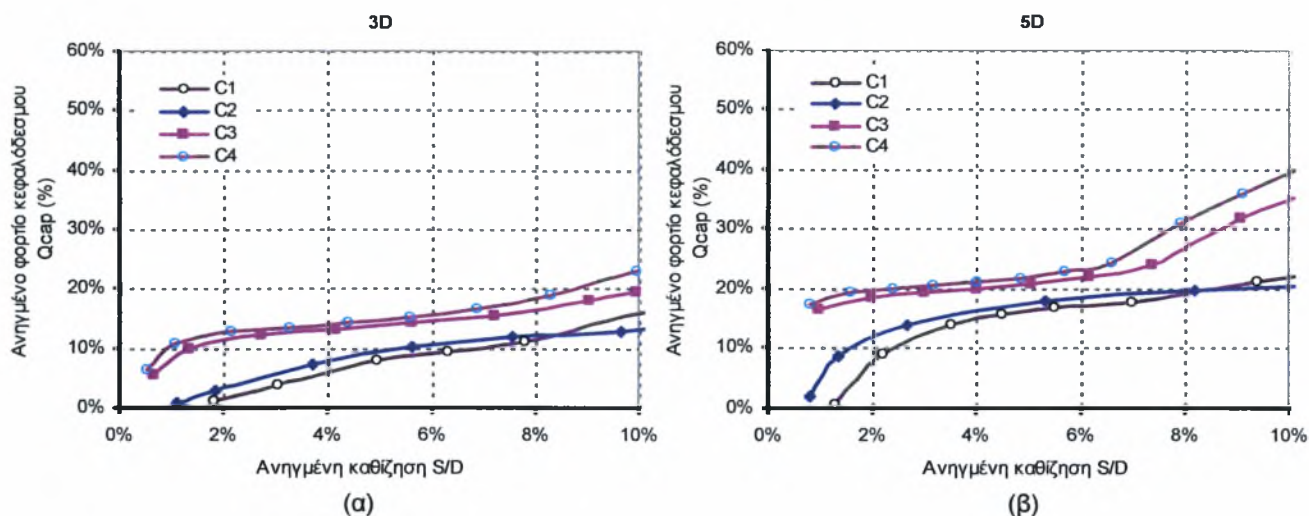
Σχήμα 4.8 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους πέντε χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 5*5, ανηγμένο μήκος $L/D=25$, σχετική απόσταση 3.0D και κατηγορία εδάφους (α) S1 και (β) S3.

4.4 Απόκριση ομάδας πασσάλων σε αργιλικό έδαφος

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση του κεφαλόδεσμου σε αργιλικά εδάφη. Οι επιμέρους πάσσαλοι ομάδας πασσάλων επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τη γεωμετρική θέση που κατέχουν στην ομάδα. Στην περίπτωση πασσάλων με εύκαμπτο κεφαλόδεσμο οι γωνιακοί πάσσαλοι αναλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο από τους υπολοίπους, το δε μικρότερο αναλαμβάνει ο κεντρικός πάσσαλος. Εξακολουθεί κατά συνέπεια να ισχύει η θεώρηση διαφορετικής απόκρισης των επιμέρους πασσάλων, με τους γωνιακούς να επιδεικνύουν τη μέγιστη δυσκαμψία, τον κεντρικό τη μικρότερη και τους υπόλοιπους να παίρνουν ενδιάμεσες τιμές. Ας σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τόσο το αναλαμβανόμενο φορτίο όσο και η αντίστοιχη δυσκαμψία μεταβάλλεται συναρτήσει της καθίζησης ή του επιβαλλόμενου φορτίου (επιπτώσεις πλαστικοποίησης σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί). Το ζήτημα αυτό έχει διερευνηθεί εκτενώς από τους Κωμοδρόμο και Μπαρέκα.

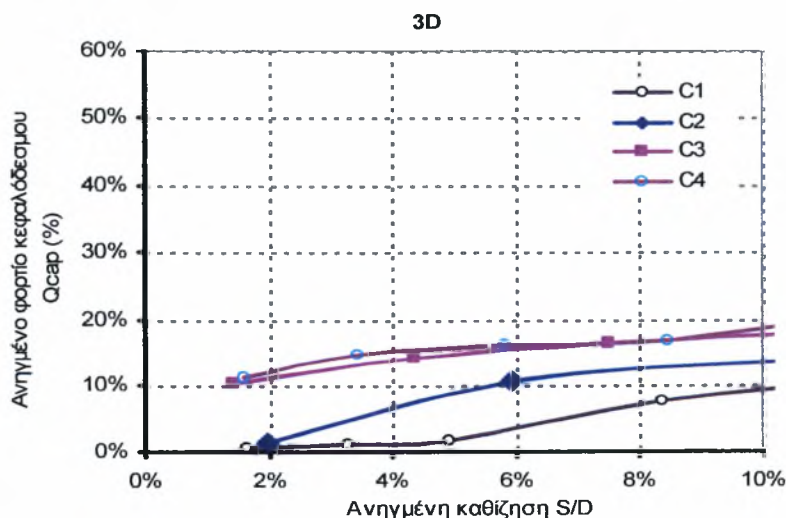
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η κατανομή του ποσοστού του επιβαλλόμενου φορτίου στον κεφαλόδεσμο, ο οποίος λειτουργεί σαν επιφανειακή θεμελίωση, και στην ομάδα των πασσάλων. Διερευνώντας το ποσοστό αυτό συναρτήσει της καθίζησης για τη διάταξη 3*3, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 4.9, παρατηρείται ότι ο ρόλος του κεφαλόδεσμου στην ανάληψη του φορτίου γίνεται σημαντικότερος καταρχήν με την αύξηση της σφιφρότητας της αργίλου και του επιπέδου της καθίζησης. Στην περίπτωση της μαλακής αργίλου, C1, για σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3.0D και για φορτίο που αντιστοιχεί στο φορτίο λειτουργίας ο κεφαλόδεσμος ελάχιστα συνεισφέρει στην απόδοση της ομάδας. Συνεισφορά τάξης 15% παρατηρείται στην οριακή τιμή της καθίζησης 10%D. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην αντίσταση αιχμής, που αποτελεί και τον κύριο μηχανισμό ανάληψης φορτίου του κεφαλόδεσμου, και κινητοποιείται σε πολύ μεγαλύτερες καθιζήσεις από την αντίσταση τριβής και επομένως όσο αυξάνονται οι καθιζήσεις το ποσοστό ανάληψης του φορτίου από την επιφανειακή θεμελίωση μεγαλώνει. Αντίστοιχα στην πολύ σφιφρή άργιλο, C4, το εύρος διακύμανσης του ποσοστού αυτού είναι 12-23%.

Με την αύξηση της σχετικής απόστασης των πασσάλων σε 5.0D, τα αντίστοιχα ποσοστά αυξάνουν και αρχίζει η παρουσία του κεφαλόδεσμου να παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάληψη του φορτίου. Η αύξηση των διαστάσεων του κεφαλόδεσμου οδηγεί σε καλύτερη κατανομή των τάσεων, ενώ η αλληλεπίδραση των πασσάλων σε αυτή την περίπτωση είναι σημαντικά μειωμένη με λιγότερο φορτίο να μεταφέρεται από τον ένα πάσσαλο στον άλλο μέσω της παράπλευρης τριβής. Ειδικά για την οριακή καθίζηση και για τύπο εδάφους C4, ο κεφαλόδεσμος αναλαμβάνει το 40% του επιβαλλόμενου φορτίου, έχει επομένως σχεδόν την ίδια απόδοση όσο και η βαθειά θεμελίωση. Για τις μαλακές αργίλους αν και η συνεισφορά έχει αυξηθεί, το ποσοστό του φορτίου που φέρει η ομάδα, παραμένει υψηλό.



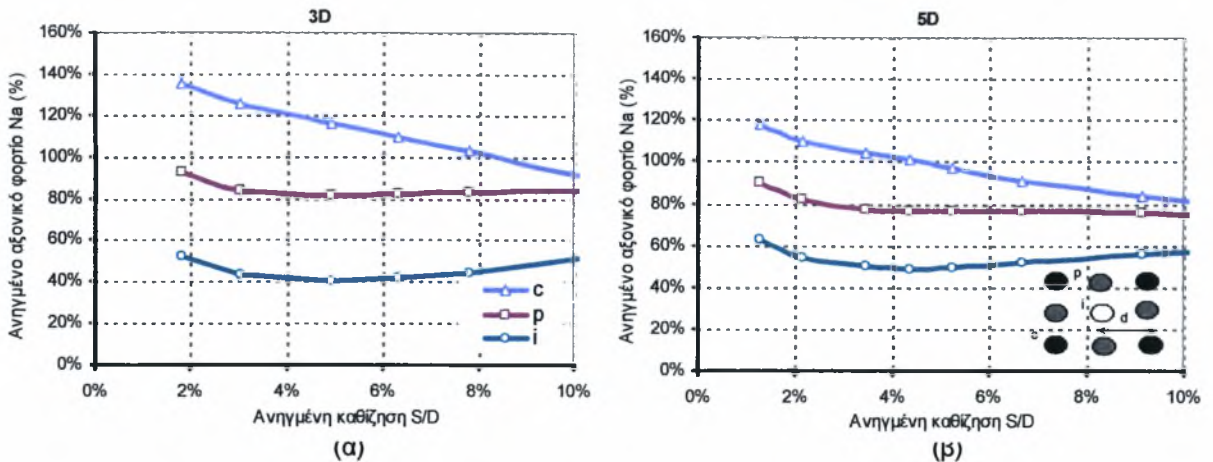
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα μεταβολής του ανηγμένου φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος συναρτήσει της καθίζησης για τις διάφορες κατηγορίες αργίλου και για διάταξη πασσάλων 3*3 σε απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.

Στην περίπτωση ομάδας πασσάλων με μεγάλο αριθμό πασσάλων, διάταξη 5*5, και για αξονική απόσταση 3.0D, σχήμα 4.10, παρατηρείται μικρή μείωση του ρόλου του κεφαλόδεσμου ως προς την ανάληψη φορτίου. Ειδικότερα το ποσοστό του φορτίου αυτού φτάνει το 10% για μαλακές αργίλους και αυξάνει στο 18% στην περίπτωση της σιφρής αργίλου. Ο μεγάλος αριθμός πασσάλων μέσα στην ομάδα αυξάνει σημαντικά το επίπεδο αλληλεπίδρασης των πασσάλων με σημαντικές επιπτώσεις στην απόκριση τους, γεγονός που περιορίζει την προσφορά του κεφαλόδεσμου.



Σχήμα 4.10 Διάγραμμα μεταβολής του ανηγμένου φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος συναρτήσει της καθίζησης για τις διάφορες κατηγορίες αργίλου και για διάταξη πασσάλων 5*5 σε απόσταση 3.0D.

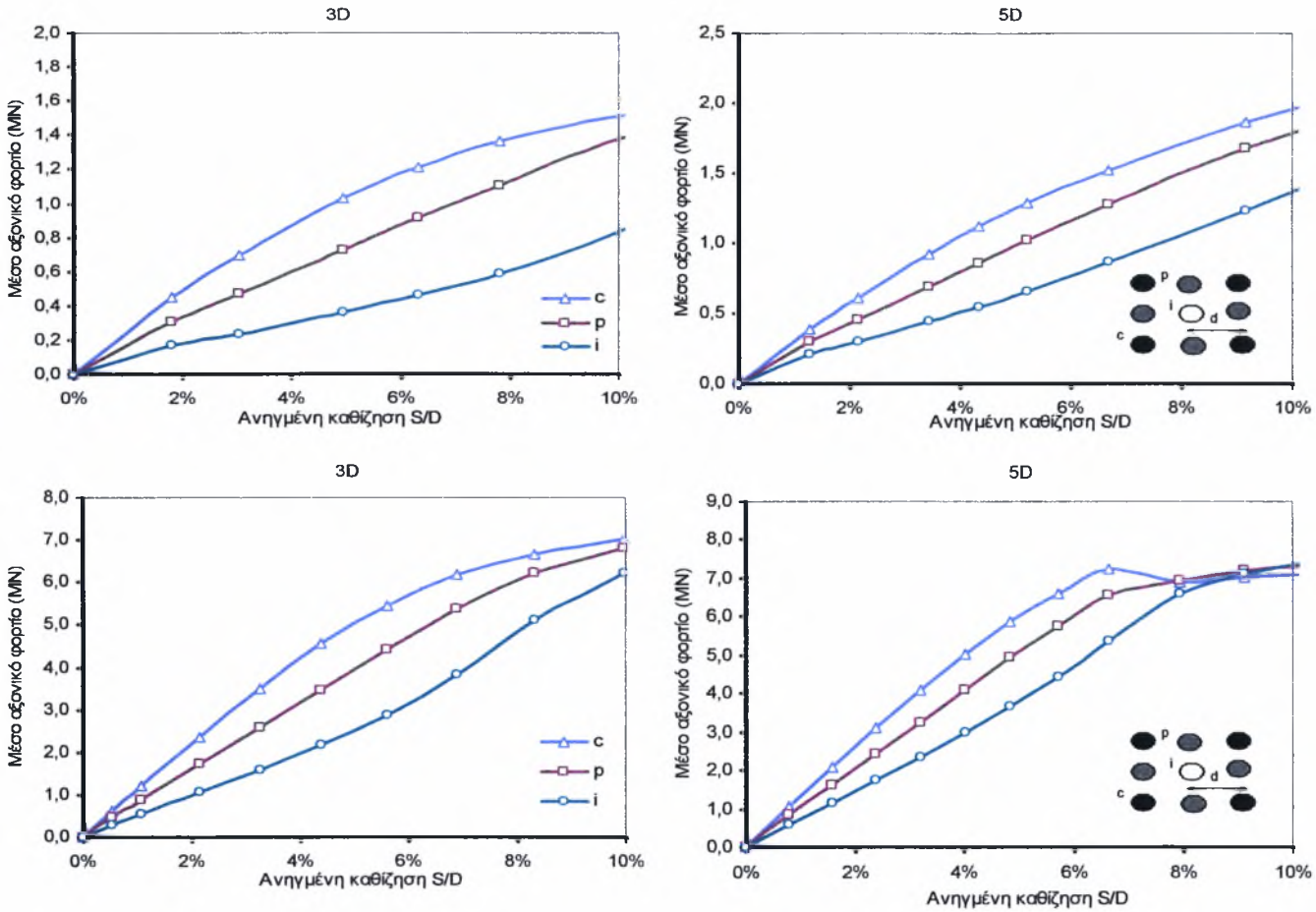
Εστία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος αποτελούν οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης στην απόκριση των πασσάλων μελών της ομάδας, ανάλογα με τη γεωμετρική θέση που κατέχουν μέσα στην ομάδα. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται διερεύνηση του ζητήματος με την ιδιαιτερότητα της παρουσίας του κεφαλόδεσμου. Στο σχήμα 4.11 δίνεται η μεταβολή της κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της διάταξης 3*3, με σχετικό μήκος $L/D=25$ και με αξονική απόσταση πασσάλων 3.0D και 5.0D για έδαφος τύπου C1. Για την καλύτερη διερεύνηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης και του βαθμού εξάρτησης της από την διάταξη των πασσάλων και το επίπεδο φόρτισης θα πρέπει να προσδιορισθεί η δράση και η συνεισφορά κάθε πασσάλου στην ομάδα στην οποία συμμετέχει. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ο κεντρικός πάσσαλος i αναλαμβάνει σημαντικά μικρότερο φορτίο από τους υπόλοιπους, ενώ ο γωνιακός πάσσαλος c αναλαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερο. Ειδικότερα για τη διάταξη με αξονική απόσταση 3.0D και για επίπεδο καθίζησης που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει το 52% του μέσου φορτίου, ενώ ο γωνιακός το 135%. Υπό την έννοια αυτή ο γωνιακός πάσσαλος εμφανίζεται κατά τρεις φορές πιο δύσκαμπτος από τον κεντρικό. Με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου και την εκδήλωση μεγαλύτερων καθιζήσεων, οι οποίες βέβαια συνοδεύονται και από τον αντίστοιχο βαθμό πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους οι διαφορές αυτές μειώνονται και απαλείφονται τελείως με την πλήρη πλαστικοποίηση. Για την πλήρη εκδήλωση του φαινομένου απαιτείται συχνά φορτίο που να οδηγεί σε καθιζήσεις που πλησιάζουν την τιμή του 20%D. Καταδεικνύεται επίσης ότι η διαφοροποίηση της απόκρισης των πασσάλων μιας ομάδας εξαρτάται όχι μόνο από την διάταξή τους αλλά κυρίως από το μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου. Όσο μικραίνει η μεταξύ των πασσάλων απόσταση τόσο μεγαλώνει η ψαλίδα ανάμεσα στην απόκριση των πασσάλων και ειδικότερα των πασσάλων c και i . Για τις συγκεκριμένες διατάξεις 3.0D και 5.0D ο κεντρικός πάσσαλος i αναλαμβάνει αρχικά φορτίο ίσο με 52% και 63% του μέσου φορτίου αντίστοιχα, και ο πάσσαλος c αναλαμβάνει αρχικά φορτίο ίσο με 135% και 118% του μέσου φορτίου. Όταν η αξονική απόσταση αυξάνεται σε 5.0D το ποσοστό αυτό αυξάνεται, γεγονός που καταδεικνύει την ευεργετική δράση της αύξησης της αξονικής απόστασης στην ομοιομορφοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου στους επιμέρους πασσάλους.



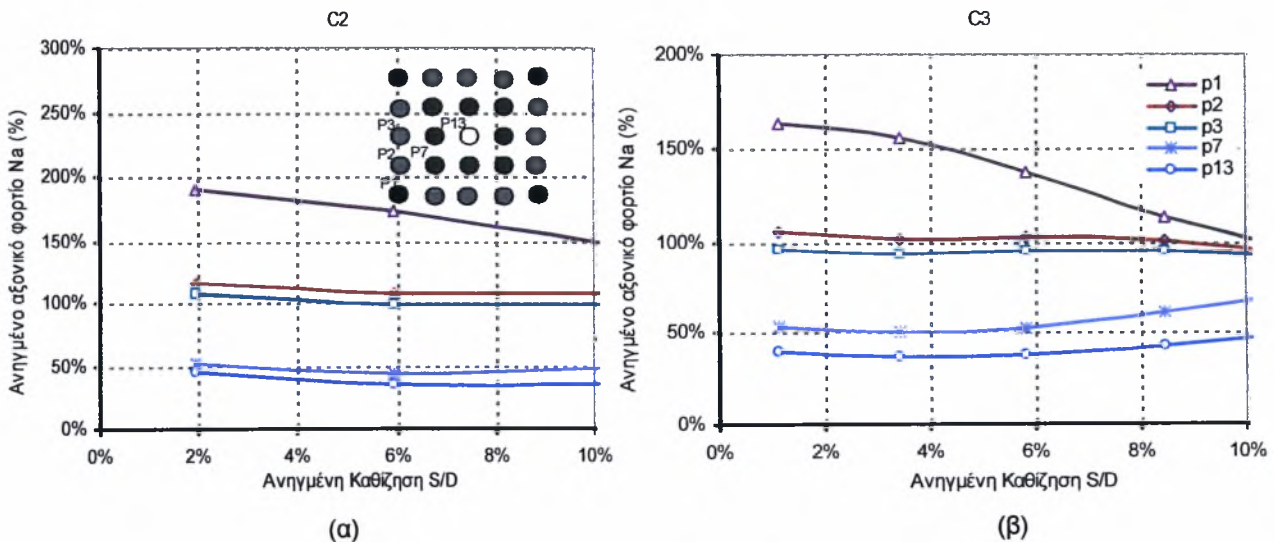
Σχήμα 4.11 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3, ανηγμένο μήκος $L/D=25$, κατηγορία εδάφους C1 και σχετική απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.

Στο σχήμα 4.12 δίνεται η μεταβολή της κατανομής του αξονικού φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της διάταξης 3*3, με σχετικό μήκος $L/D=25$ και με αξονική απόσταση πασσάλων 3.0D και 5.0D για έδαφος τύπου C1 και C4. Από τα σχήματα 4.9 και 4.10 προκύπτει ότι οι ακραίοι πάσσαλοι c εμφανίζουν μεγαλύτερη δυσκαμψία δηλαδή αναλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο από τους υπόλοιπους για την ίδια καθίζηση. Ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει το μικρότερο φορτίο σε όλες τις περιπτώσεις και εμφανίζει τη μικρότερη δυσκαμψία. Το ποσοστό του φορτίου που αναλαμβάνουν οι πάσσαλοι αυξάνεται με τη σφιγρότητα της αργίλου. Συγκεκριμένα για καθίζηση της τάξης του 2%, με αξονική απόσταση πασσάλων 3.0D και για έδαφος τύπου C1 και C4 ο πάσσαλος c αναλαμβάνει αξονικό φορτίο ίσο με 0.5, 2.2 MN αντίστοιχα. Παρατηρείται επίσης ότι όταν η απόκριση φορτίου – καθίζησης των πασσάλων παύει να είναι γραμμική ελαστική και αρχίζει η πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μειώνονται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μερική διαρροή του εδάφους γύρω από τους πασσάλους, το οποίο έχοντας εξαντλήσει τη διατμητική του αντοχή δεν είναι σε θέση να μεταφέρει πλέον περαιτέρω αύξηση τάσεων σε γεινιάζοντα στοιχεία. Το φαινόμενο εντονοποιείται με την συνεχή εξομοίωση των φορτίων όσο αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο και κατά συνέπεια η πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους. Χαρακτηριστικά παρατηρείται ότι για την κατηγορία εδάφους C4 (πολύ σφιγρή άργιλος) και για σχετική απόσταση 5.0D οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μηδενίζονται για ανηγμένη καθίζηση της τάξης του 9% της διαμέτρου του πασσάλου, ενώ για απόσταση 3.0D, όπου η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη, απαιτείται μεγαλύτερη καθίζηση της τάξης του 11%. Για την κατηγορία C1 (μαλακή άργιλος) και για σχετική απόσταση 3.0D και 5.0D, η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη σε σχέση με την κατηγορία C4. Οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης φαίνεται ότι θα μηδενίζονται για ανηγμένη καθίζηση μεγαλύτερη της τάξης του 9% της διαμέτρου του πασσάλου για σχετική απόσταση 5.0D, ενώ για σχετική απόσταση 3.0D η αλληλεπίδραση εντονοποιείται και απαιτείται καθίζηση μεγαλύτερη της τάξης του

11%.

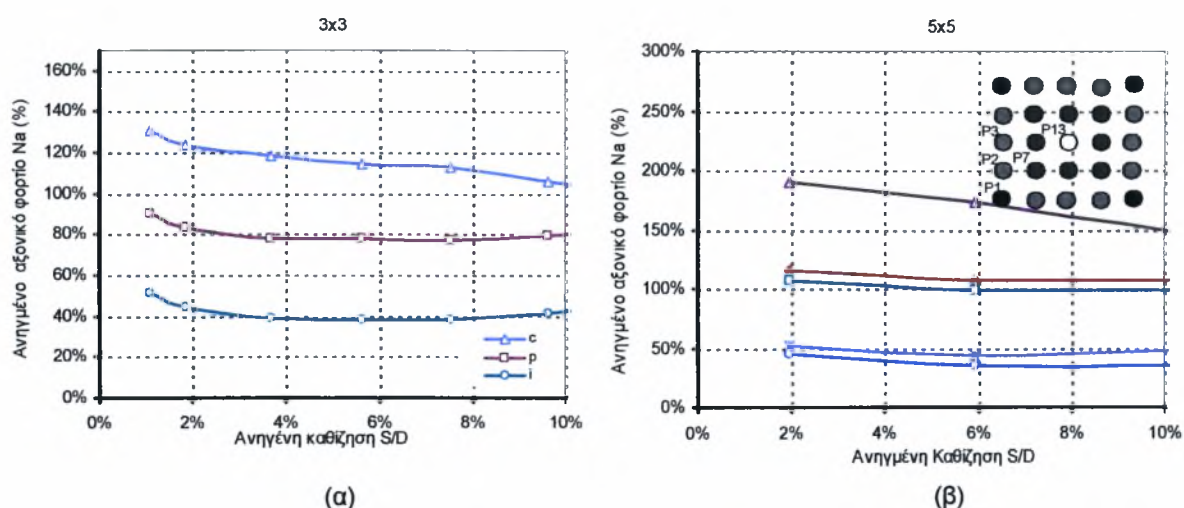


Σχήμα 4.12 Κατανομή του αξονικού φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3, ανηγμένο μήκος $L/D=25$, κατηγορία εδάφους C1, C4 και σχετική απόσταση 3.0D και 5.0D.



Σχήμα 4.13 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 5*5, ανηγμένο μήκος $L/D=25$, κατηγορία εδάφους, (α) C2 και (β) C3 και σχετική απόσταση 3.0D.

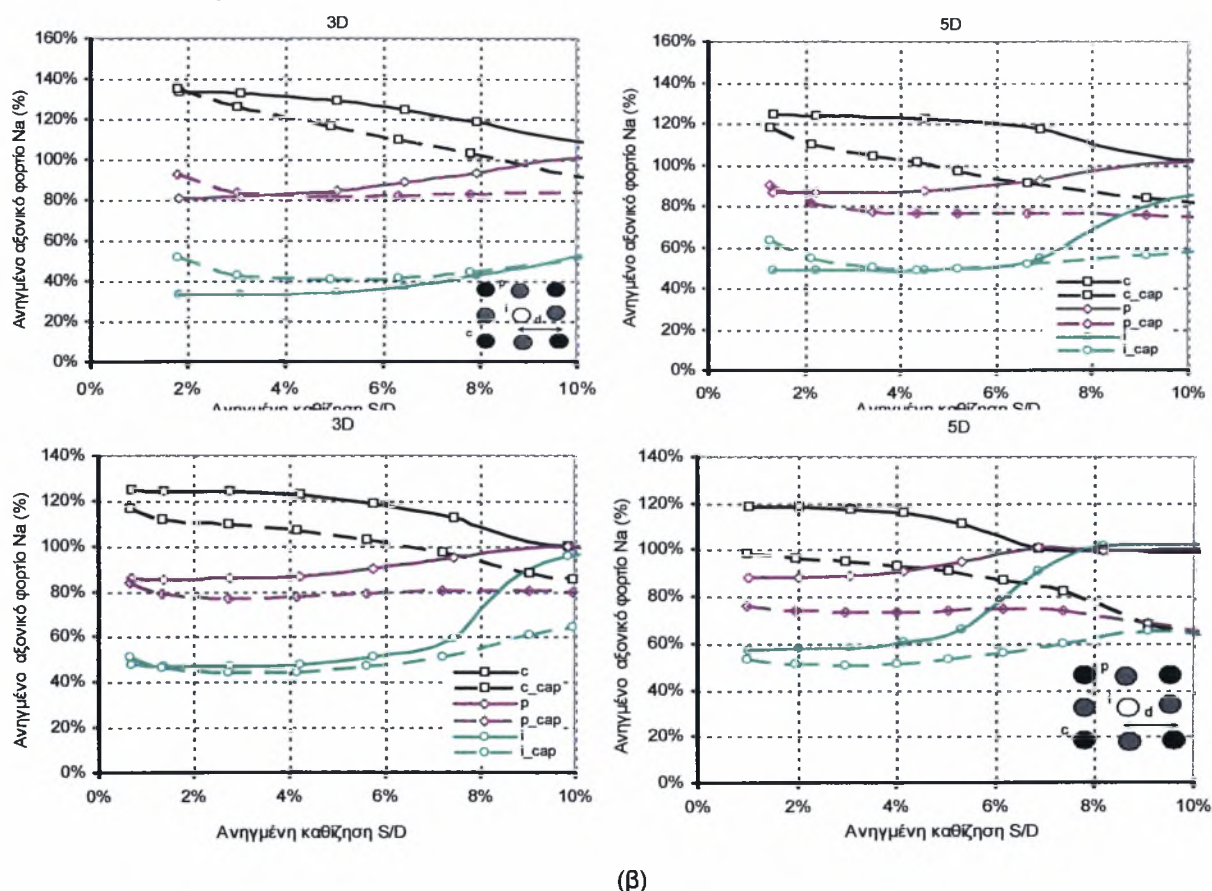
Μεγαλύτερες είναι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στους επιμέρους πασσάλους, όπως αντίστοιχα και στην εν γένει απόκριση της ομάδας, στις περιπτώσεις διατάξεων με μεγάλο αριθμό πασσάλων. Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η κατανομή του φορτίου για έδαφος τύπου C2 και C3, στους πέντε χαρακτηριστικούς πασσάλους της διάταξης 5*5 με σχετικό μήκος $L/D=25$ και σχετική απόσταση 3.0D. Παρατηρείται η μεγάλη διαφορά στην απόκριση του γωνιακού πασσάλου (χαρακτηριστικός πάσσαλος P1) και του κεντρικού πασσάλου (χαρακτηριστικός πάσσαλος P13). Ο κεντρικός πάσσαλος, P13, αναλαμβάνει πολύ μικρότερο φορτίο ενώ ο γωνιακός πάσσαλος P1 αναλαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερο από τους υπόλοιπους. Ειδικότερα για την κατηγορία εδάφους C2 με αξονική απόσταση 3.0D και για επίπεδο καθίζησης που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει το 50% του μέσου φορτίου, ενώ ο γωνιακός το 190%. Υπό την έννοια αυτή ο γωνιακός πάσσαλος εμφανίζεται κατά τέσσερις φορές πιο δύσκαμπτος από τον κεντρικό. Με την αύξηση της στιφρότητας της αργίλου, τόσο ο κεντρικός όσο και ο γωνιακός αναλαμβάνουν μικρότερο ποσοστό του μέσου φορτίου. Στην περίπτωση της στιφρής αργίλου, C3, ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει το 40% του μέσου φορτίου, ενώ ο γωνιακός το 170%, ποσοστά μικρότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα της μαλακής αργίλου. Παρατηρείται ότι η απόκλιση της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων και ειδικότερα του κεντρικού και του γωνιακού κυμαίνονται στα ίδια ποσοστά σε σύγκριση με τα ποσοστά της κατηγορίας C2.



Σχήμα 4.14 Σύγκριση κατανομής του ανηγμένου αξονικού μέσου φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης (α) 3*3 και (β) 5*5, με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για κατηγορία εδάφους C2, και σχετική απόσταση 3.0D.

Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η σύγκριση κατανομής του ανηγμένου αξονικού μέσου φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης (α) 3*3 και (β) 5*5, με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για κατηγορία εδάφους C2, και σχετική απόσταση 3.0D. Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων στην ομάδα, για την ίδια πάντα εδαφική τομή, οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση της απόκρισης φορτίου-καθίζησης ανάμεσα στον γωνιακό και τον κεντρικό πάσσαλο. Στις περιπτώσεις διατάξεων με μεγάλο αριθμό πασσάλων τόσο ο γωνιακός όσο και ο κεντρικός

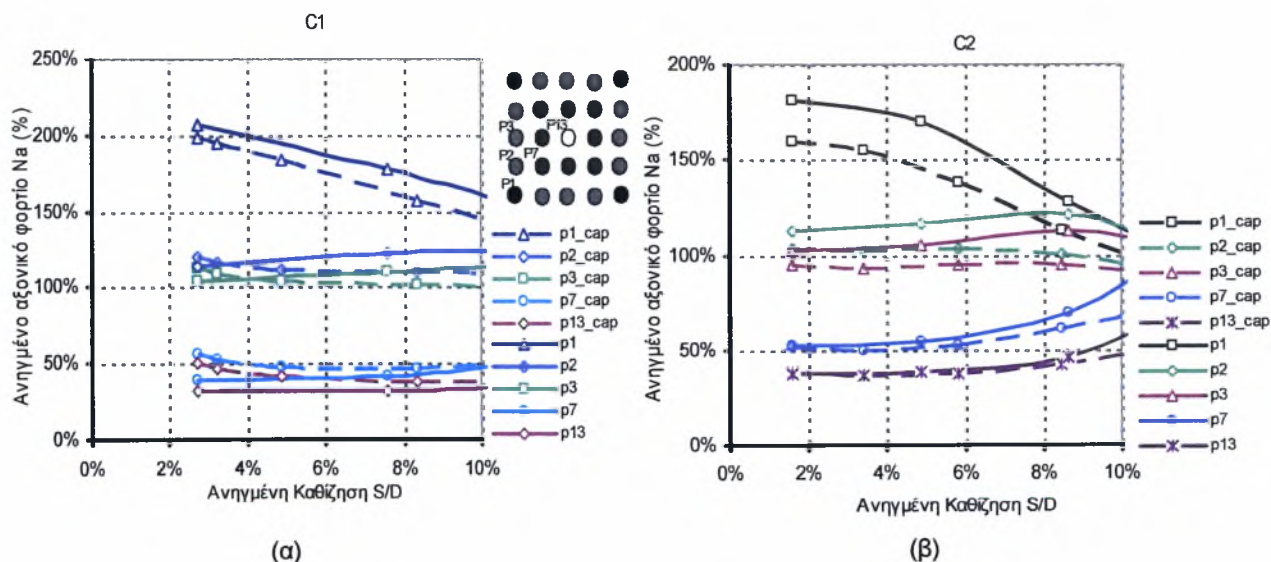
πάσσαλος, για δεδομένη τιμή καθίζησης και την ίδια κατηγορία εδάφους αναλαμβάνουν μικρότερο ποσοστό του μέσου φορτίου. Παρατηρείται επίσης ότι η απόκλιση της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων και ειδικότερα του κεντρικού και του γωνιακού είναι μεγαλύτερη για τη διάταξη 5*5, από ότι στην περίπτωση με μικρότερο αριθμό πασσάλων στην ομάδα. Ειδικότερα για καθίζηση της τάξης του 4%, για την διάταξη 5*5 ο γωνιακός πάσσαλος εμφανίζεται κατά τέσσερις φορές πιο δύσκαμπτος από τον κεντρικό ενώ για διάταξη 3*3 τρεις φορές πιο δύσκαμπτος. Αυξανόμενου του επιβαλλόμενου φορτίου και της προκαλούμενης καθίζησης ο λόγος των δυσκαμψιών που επιδεικνύουν οι δύο αυτοί χαρακτηριστικοί πάσσαλοι μειώνεται.



Σχήμα 4.15 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο και μη, κατηγορία εδάφους (α) C1 και (β) C3 και σχετικές αποστάσεις 3.0D και 5.0D.

Στο σχήμα 4.15 με διακεκομμένη γραμμή δίνονται οι κατανομές του φορτίου στους επί μέρους πασσάλους για την περίπτωση ομάδας 3*3 και για κατηγορία εδάφους (α) C1 και (β) C3 για τις δύο περιπτώσεις σχετικών αποστάσεων που εξετάστηκαν ενώ με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι αντίστοιχες κατανομές χωρίς την παρουσία κεφαλόδεσμου, όπως αυτές εξετάστηκαν στην διατριβή η οποία εκπονήθηκε από την Μπαρέκα Σπ. (2007). Δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση των αποκρίσεων στις δύο περιπτώσεις. Οι πάσσαλοι αναλαμβάνουν και πάλι διαφορετικό φορτίο ανάλογα με τη γεωμετρική θέση που κατέχουν στην ομάδα, με το γωνιακό πάσσαλο να

εμφανίζει τριπλάσια δυσκαμψία από τον κεντρικό για χαμηλά επίπεδα καθίζησης με αξονική απόσταση 3.0D ενώ για απόσταση 5.0D η δυσκαμψία διπλασιάζεται. Στην περίπτωση της στιφρής αργίλου καταδεικνύεται ότι όσο αυξάνει η μεταξύ των πασσάλων απόσταση τόσο μεγαλώνει η ψαλίδα ανάμεσα στον γωνιακό πάσσαλο c της ομάδας χωρίς κεφαλόδεσμο και στον c_cap της ομάδας με κεφαλόδεσμο. Συγκεκριμένα ο πάσσαλος c αναλαμβάνει το 120% του μέσου φορτίου και ο c_cap 100%. Ειδικότερα για τη διάταξη με αξονική απόσταση 5.0D και για επίπεδο καθίζησης που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο ο πάσσαλος c αναλαμβάνει το 120% του μέσου φορτίου και ο c_cap 100%. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο κεντρικός πάσσαλος i_cap στην περίπτωση της μαλακής αργίλου αναλαμβάνει μεγαλύτερο μέσο φορτίο από ότι ο i . Παρατηρείται επίσης ότι η μέγιστη διαφορά απόκρισης εμφανίζεται στις μικρότερες καθιζήσεις όταν δεν έχει λάβει χώρα ουσιαστικά πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους. Οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μηδενίζονται για ανηγμένη καθίζηση της τάξης του 8% της διαμέτρου του πασσάλου για την ομάδα χωρίς κεφαλόδεσμο ενώ για ομάδα πασσάλων με κεφαλόδεσμο είναι της τάξης του 9%. Για την κατηγορία C1 (μαλακή άργιλος) και για σχετική απόσταση 3.0D και 5.0D, η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη. Από το διάγραμμα κατανομής του φορτίου παρατηρείται μικρή μείωση του ρόλου του κεφαλόδεσμου ως προς την ανάληψη φορτίου για τη μαλακή άργιλο, τύπου C1, ενώ το ποσοστό του φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος αυξάνει με τη στιφρότητα της αργίλου.



Σχήμα 4.16 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 5*5 με κεφαλόδεσμο και μη, κατηγορία εδάφους (α) C1 και (β) C4 και σχετική απόσταση 3.0D.

Στις περιπτώσεις διατάξεων με μεγάλο αριθμό πασσάλων δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση των αποκρίσεων στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση διάταξης 5*5, και για αξονική απόσταση 3.0D παρατηρείται μείωση του ρόλου του κεφαλόδεσμου ως προς την ανάληψη φορτίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για την διερεύνηση της συμπεριφοράς ομάδας πασσάλων με ενιαίο κεφαλόδεσμο σε ομογενές αμμώδες και αργιλικό έδαφος.

Για το σκοπό αυτό διεξήχθησαν τρισδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις για διάφορες διατάξεις ομάδων πασσάλων. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν διατάξεις 3*3 με αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3.0D και 5.0D και 5*5 με αξονική απόσταση 3.0D για τις 7 κατηγορίες εδάφους, 4 τύποι αργίλου και 3 άμμου, που εξετάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Οι εδαφικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 4.1. Οι διάμετρος των πασσάλων είναι, όπως και στις εξετασθείς περιπτώσεις 1.0 m, το δε ανηγμένο μήκος τους 25.0. Ο κεφαλόδεσμος έχει πάχος 2.0 m και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του είναι όμοια με αυτά των πασσάλων. Η ανάλυση και σε αυτή την περίπτωση έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D}.

Πρώτη κατηγορία αναλύσεων αποτέλεσαν οι περιπτώσεις πασσάλων σε αργιλικό έδαφος. Ιδιαίτερα σημαντικές, όπως αποδείχτηκε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στην κατανομή του φορτίου στους επί μέρους πασσάλους της ομάδας οι οποίοι επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τη γεωμετρική θέση που κατέχουν στην ομάδα. Συγκεκριμένα από τις ομάδες πασσάλων πακτωμένης κεφαλής που εξετάστηκαν οι γωνιακοί πάσσαλοι αναλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο από τους υπολοίπους, το δε μικρότερο αναλαμβάνει ο κεντρικός πάσσαλος, ενώ αντίστοιχα οι περιμετρικοί και ενδιάμεσοι πάσσαλοι εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές. Υπό την έννοια αυτή η δυσκαμψία των επιμέρους πασσάλων παίρνει διαφορετικές τιμές με τους γωνιακούς να επιδεικνύουν τη μέγιστη δυσκαμψία, τον κεντρικό τη μικρότερη και τους υπόλοιπους να παίρνουν ενδιάμεσες τιμές. Ας σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τόσο το αναλαμβανόμενο φορτίο όσο και η αντίστοιχη δυσκαμψία μεταβάλλεται συναρτήσει της καθίζησης ή του επιβαλλόμενου φορτίου. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα όλων των διατάξεων ομάδων που εξετάστηκαν καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του αριθμού των πασσάλων στην ομάδα, για την ίδια πάντα εδαφική τομή, οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση της απόκρισης φορτίου-καθίζησης ανάμεσα στον γωνιακό και τον κεντρικό πάσσαλο, ενώ αυξανόμενου του επιβαλλόμενου φορτίου και της προκαλούμενης καθίζησης ο λόγος των δυσκαμψιών που επιδεικνύουν οι δύο αυτοί χαρακτηριστικοί πάσσαλοι μειώνεται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η κατανομή του ποσοστού του επιβαλλόμενου φορτίου στον κεφαλόδεσμο. Πιο συγκεκριμένα το ποσοστό του φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος

αυξάνει με τη σφιγρότητα της αργίλου και με την αύξηση της αξονικής απόστασης μεταξύ των πασσάλων. Η αύξηση αυτή είναι της τάξης του 40% όταν η αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι 5.0D, ενώ μειώνεται καθοριστικά στην τιμή 10% για αξονική απόσταση 3.0D. Στη διάταξη 5*5 και για αξονική απόσταση 3.0D, η συνεισφορά του κεφαλόδεσμου είναι πρακτικά αμελητέα.

Επόμενη κατηγορία αναλύσεων αποτέλεσαν οι περιπτώσεις πασσάλων σε αμμώδες έδαφος. Αναλυτικότερα στις άμμους παρατηρήθηκε ότι ο κεντρικός πάσσαλος, *i*, αναλαμβάνει πολύ μικρότερο φορτίο από τους υπόλοιπους. Ειδικότερα για χαλαρή άμμο και μικρή σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει φορτίο της τάξης του 40% του μέσου φορτίου. Όταν η αξονική απόσταση αυξάνεται το ποσοστό αυτό αυξάνεται μέχρι και 60% του μέσου φορτίου, γεγονός που καταδεικνύει την ευεργετική δράση της αύξησης της αξονικής απόστασης στην ομοιομορφοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου στους επιμέρους πασσάλους. Αντίθετα ο γωνιακός πάσσαλος επιβαρύνεται με φορτίο 40% μεγαλύτερο του μέσου. Η σύγκριση της απόκρισης του κεντρικού με το γωνιακό πάσσαλο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο γωνιακός πάσσαλος επιδεικνύει διπλάσια δυσκαμψία από τον κεντρικό. Η διαφορά αυτή μειώνεται αυξανόμενης της καθίζησης, ενώ όταν αυξηθεί και η αξονική απόσταση επέρχεται πλήρης ομοιομορφοποίηση της κατανομής για καθίζηση της τάξης του 10% ή και μικρότερη σε περίπτωση μεγάλων αξονικών αποστάσεων. Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τις ενδιάμεσες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων για την ίδια πάντα κατηγορία εδάφους. Η αύξηση της πυκνότητας της άμμου οδηγεί σε συνεχή μείωση της απόκλισης απόκρισης των δύο αυτών χαρακτηριστικών πασσάλων και για πολύ πυκνές άμμους οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων είναι ιδιαίτερα μικρές και οι πάσσαλοι επιδεικνύουν πρακτικά την ίδια συμπεριφορά ανεξάρτητα από τη θέση που καταλαμβάνουν στην ομάδα. Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων επιβαρύνει την απόκλιση της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων.

Όσον αφορά την παρουσία του κεφαλόδεσμου αποδεικνύεται ότι ο ρόλος του είναι αρκετά σημαντικός αφού συμβάλει σημαντικά στην ανάληψη του επιβαλλόμενου φορτίου. Ακόμα και στις χαλαρές άμμους και σε μικρή αξονική απόσταση η αύξηση της φέρουσας ικανότητας των πασσάλων είναι αξιοσημείωτη και φτάνει στο 35% για σχετική απόσταση 5.0D. Το ποσοστό αυτό γίνεται ιδιαίτερα υψηλό στην περίπτωση της πυκνής άμμου, όπου η φέρουσα ικανότητα παίρνει αρκετά μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες χωρίς την παρουσία του κεφαλόδεσμου. Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ποσοστού επαύξησης της φέρουσας ικανότητας. Στη χαλαρή άμμο η παρουσία του κεφαλόδεσμου δεν επιφέρει ουσιαστική μεταβολή στην απόκριση των πασσάλων ενώ στην πυκνή άμμο αυξάνεται το οριακό φορτίο κατά 30% .

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαφαίνεται ότι η παρουσία κεφαλόδεσμου στις ομάδες των πασσάλων επηρεάζει την απόκριση της θεμελίωσης,

ειδικότερα όταν το έδαφος εμφανίζει σημαντική διατμητική αντοχή και ο κεφαλόδεσμος δυσκαμψία ίδιας ή μεγαλύτερης τάξης από αυτήν των πασσάλων. Μικρότερη επιρροή παρουσιάζεται στα αργιλικά εδάφη, όπου ο κύριος μηχανισμός ανάληψης φορτίου όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 4 είναι η κινητοποίηση της πλευρικής αντίστασης περιμετρικά των πασσάλων. Στις περιπτώσεις πυκνών αμμωδών εδαφών, όπου βέβαια κάτω από ειδικές συνθήκες και απαιτήσεις θα απαιτηθεί η θεμελίωση με πασσάλους, ο κεφαλόδεσμος συμβάλει σημαντικά στην ανάληψη του επιβαλλόμενου φορτίου, ειδικά στις περιπτώσεις ομάδων με μεγάλη αξονική απόσταση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αναγνωστόπουλος, Χ., Γεωργιάδης Μ., Πιπιάκης Κ. (1994). Θεμελιώσεις – Αντιστηρίξεις. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Α.Π.Θ.
- [2] Κωμοδρόμος Αιμ. (2001), Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική – Γραμμική-Μη Γραμμική Ανάλυση. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- [3] Κωμοδρόμος Αιμ. (2004), Αριθμητικός Προσδιορισμός Απόκρισης Ομάδας Πασσάλων με Ενιαίο Κεφαλόδεσμο υπό Κατακόρυφη Φόρτιση. *Τεχνικά Χρονικά*, Τεύχος 1, 57-68
- [4] Κωμοδρόμος Αιμ., Μπαρέκα Σπ. (2006), Ανάπτυξη αρνητικών τριβών σε ομάδες πασσάλων: Αποτίμηση επιπτώσεων στους επιμέρους πασσάλους. 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής
- [5] Κωστόπουλος Σ. (1999), Σημειώσεις Γεωτεχνικών Κατασκευών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας
- [6] Κωστόπουλος Σ. (2000), Σημειώσεις Εδαφομηχανικής IV (Διίχνευση της Γεωμάζας), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας
- [7] Μπαρέκα Σπ. (2007), Συμβολή στη Διερεύνηση της Απόκρισης Ομάδας Πασσάλων υπό Κατακόρυφη Φόρτιση. *Διδακτορική*
- [8] Berezantev, V. G., Khristoforov, V. and Golubkov V. (1961). Load Bearing Capacity and Deformation of Piled Foundations. *Proc. 5th Int. Conf. S. M. & F.E.*, Vol. 2, 11-15.
- [9] Burland, J. B. (1973). Shaft Friction of Piles in Clay – A simple fundamental approach. *Ground Engineering*, Vol. 6, No. 3:30-42.
- [10] Canadian Geotechnical Society (1985). Canadian Foundation engineering Manual. Vancouver.
- [11] Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966). Load Transfer for axially Loaded piles in Clay. *Journal of Soil Mech. and Found. Eng.*, ASCE, Vol. 92, SM2: 1-26.

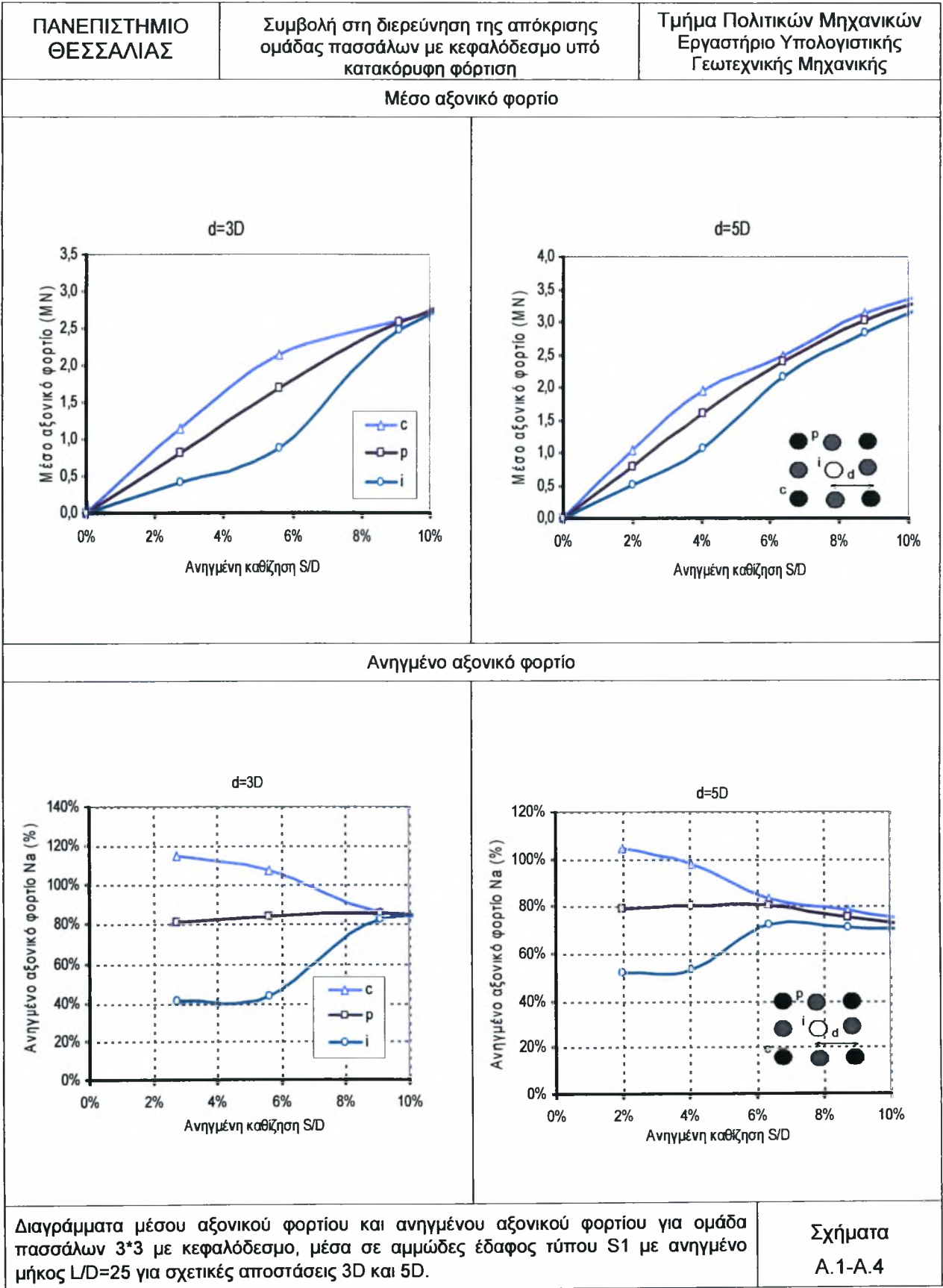
- [12] Comodromos E. (2002), Response prediction of horizontally loaded pile groups, submitted for publication.
- [13] Comodromos, E (2003). Response prediction of horizontally loaded pile groups. *Geotechnical Engineering Journal*, Vol. 34, No. 2:123-133.
- [14] Comodromos, E.M. (2004). Response evaluation of axially loaded fixed-head pile groups using 3D nonlinear analysis. *Soils and Foundations*, Vol. 44, No. 2.:31-39.
- [15] Comodromos, E.M. and Bareka, S.V. (2005a). Evaluation of Negative Skin Friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis. *Computers and Geotechnics*, Vol. 32, No. 3:210-221.
- [16] Comodromos, E.M. and Bareka, S.V. (2005b). Response Prediction for Axially Loaded Pile Groups in Clays using 3D Nonlinear Analysis. *16th Int. Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Ozaka, Japan, 2095-2098.
- [17] Comodromos, E.M. and Bareka, S.V. (2006). On the response Prediction of axially Loaded Fixed Head Pile Groups in Clayey Soils, (submitted for publication).
- [18] Horikoshi, K. and Randolph, M. (1999). Estimation of overall settlement of piled raft. *Soils and Foundations*, Vol. 39, No. 2:pp. 59-68.
- [19] Katzenbach, R. and Moormann, C. (1997). Design of axially loaded piles and pile groups – German practice. *Design of axially loaded piles – European practice* (eds by de Cock F. and Legrand C.), A. A. Balkema, Rotterdam, 177-201.
- [20] Lee, C. Y. (1993). Pile group settlement analysis by hybrid layer approach. *Journal of Geotech. Eng. ASCE*, Vol. 119, No. 6:984-997.
- [21] McClelland, B. (1974). Design of Deep Penetration Piles for ocean Structures. *Journal of Geot. Eng. Div. ASCE*, Vol. 100, No 7:705-747.
- [22] Meyerhof, G.G. (1976). Bearing Capacity and Settlement of pile foundations. *Journal of Soil Mech. and Found Eng. ASCE*, Vol 102, No. 3:195-228.

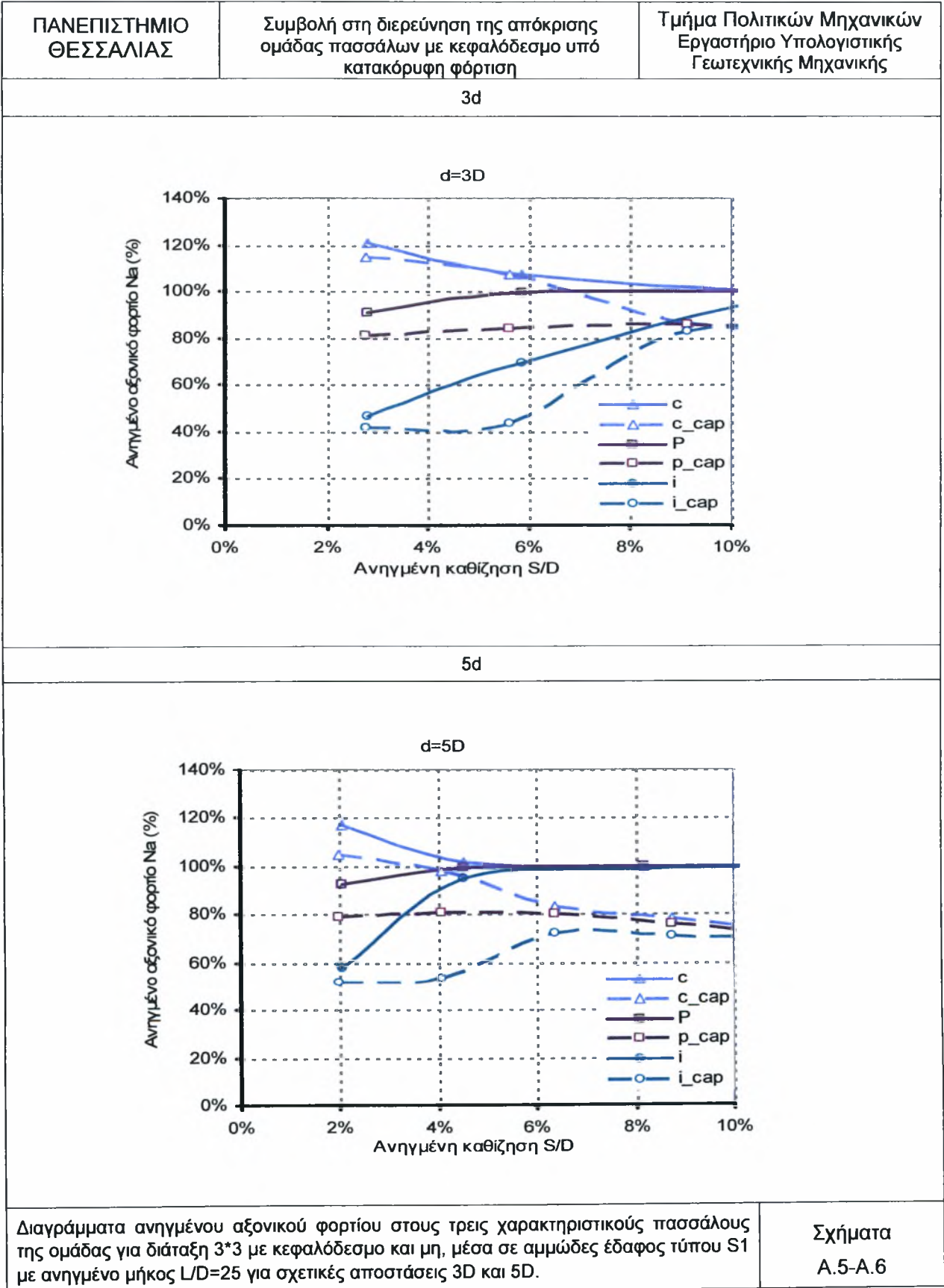
- [23] Mindlin, R.D. (1936). Force at a point in the Interior of a Semi-Infinite Solid. *Physics*, Vol. 7, 192-195.
- [24] O' Neil, M.W., Hawkinw R.A. and Mahar, L.J (1982). Load transfer mechanism in piles and pile groups. *Journal of Geotech. Eng. Div. ASCE*, Vol. 108, No. 12: 1605-1623.
- [25] Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980). Pile foundation analysis and design. J. Wiley & Sons Ltd, New York.
- [26] Poulos, H.G. (1989). Pile behaviour – theory and application. *Géotechnique*, Vol. 39, No. 3:366-415.
- [27] Prakash, S. and Sharma H. (1990), Pile foundations in engineering practice. John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- [28] Randolph, M.F. and Wroth, C.P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of Geotech. Eng. ASCE*, Vol 104, No. 12:1465-1488.
- [29] Randolph, M.F. (1994). Design method for pile group and piled raft. *13th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* Vol. 5, 61-82, New Delhi.
- [30] Skempton A.W. (1953), 'Discussion: Piles and Pile Foundations, Settlement of pile Foundations'. *3rd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol. 3: 172-181.
- [31] Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). Soil mechanics in engineering practice. New York: Wiley.
- [32] Tomlinson, M. J. (1957). The adhesion of piles Driven in Clay Soils. *4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol. 2: 66-71.
- [33] Tomlinson, M. J. (1970). Some effects of pile driving on skin friction. *Conf. on beh. of piles*, Inst. Civ. Engrs., London: 59-66.
- [34] Tomlinson, M. J. (1993), Pile Design and Construction Practice.
- [35] Vesic, A. S. (1967). A study of Bearing Capacity of Deep Foundations. Final Rep., Proj. B-189, School of Civil Eng., Georgia Inst. Tech., Atlanta.

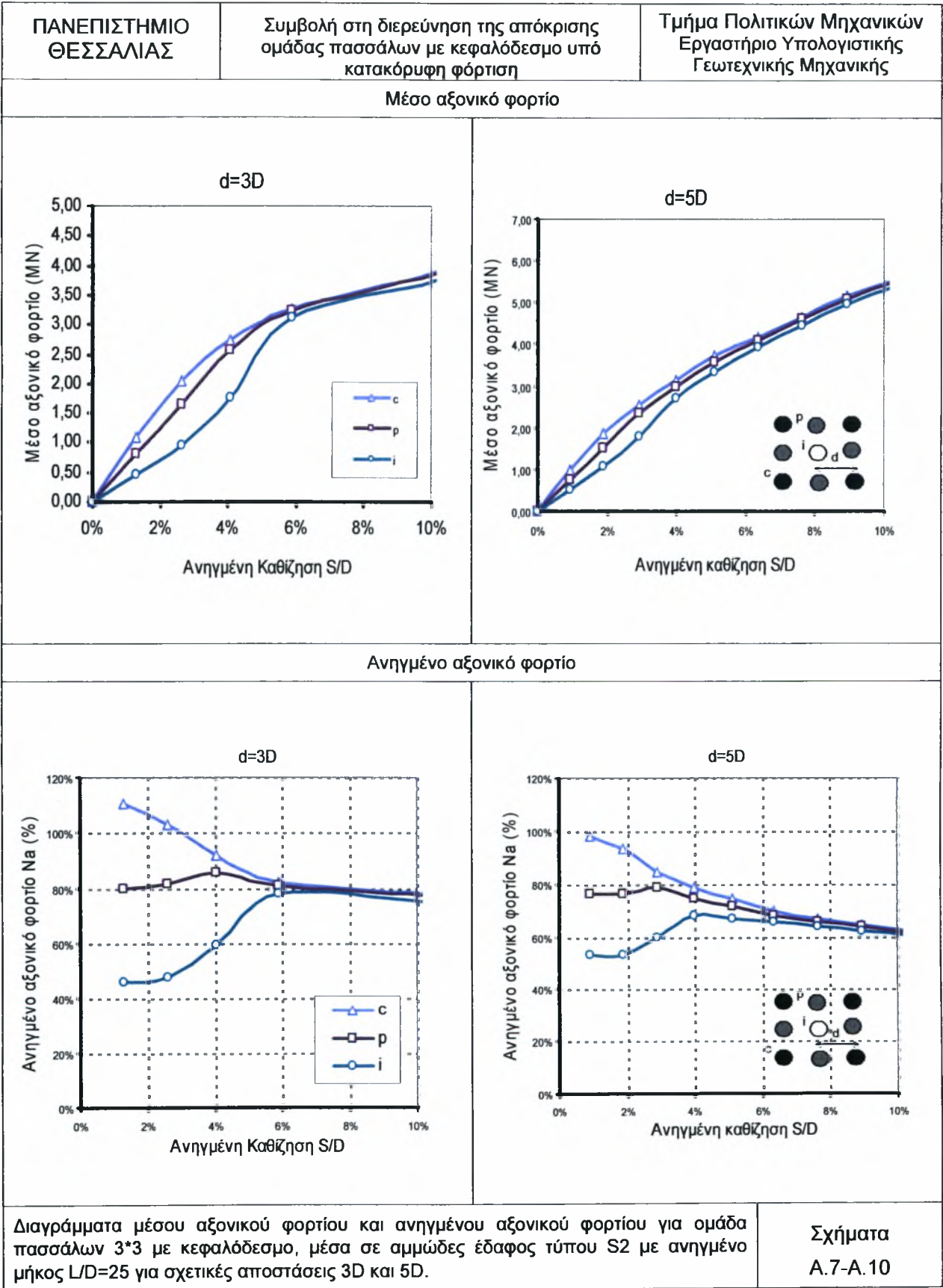
- [36] Vesic, A. S. (1970). Tests on instrumented piles, Ogeechee river site. *Journal Soil Mech. and Found. Eng. ASCE*, Vol. 96, No. 2: 561-584.
- [37] Vesic, A. S. (1977). Design of pile foundations. Transportation research board, TRB, Washington D.C. No. 42.
- [38] FLAC (1998), Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions.

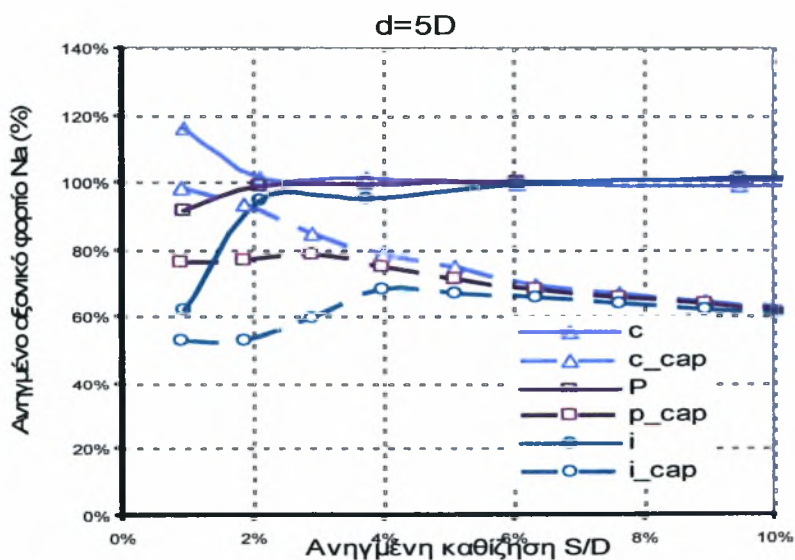
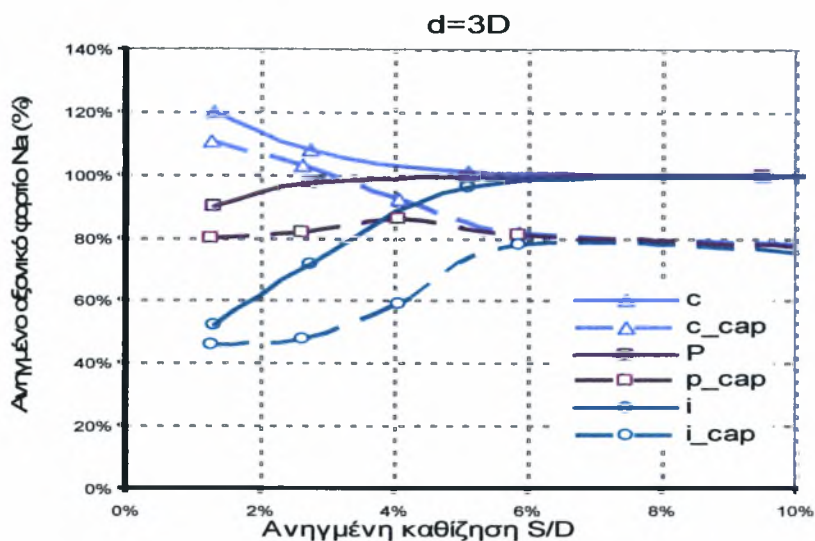
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Διαγράμματα άμμου

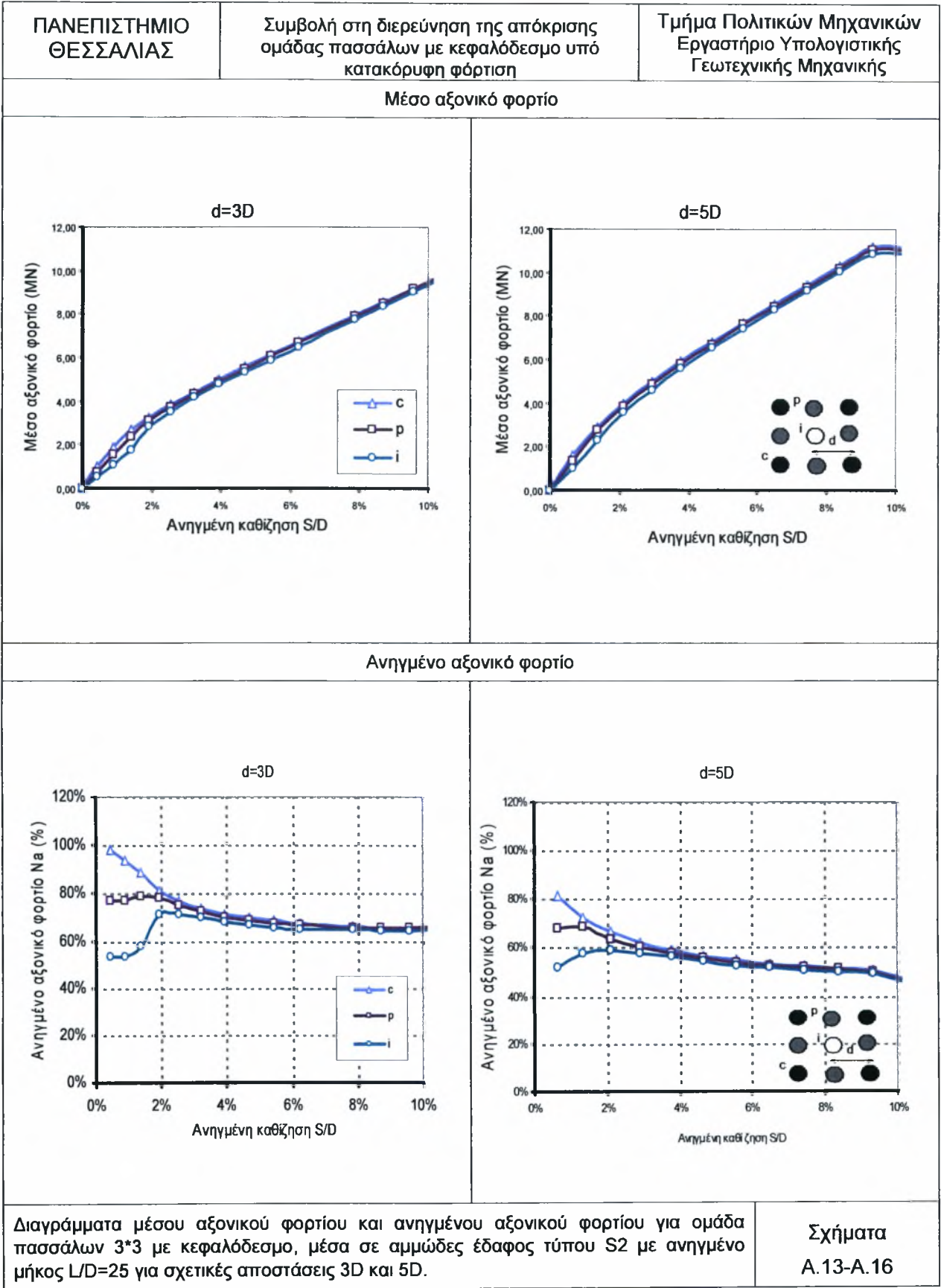




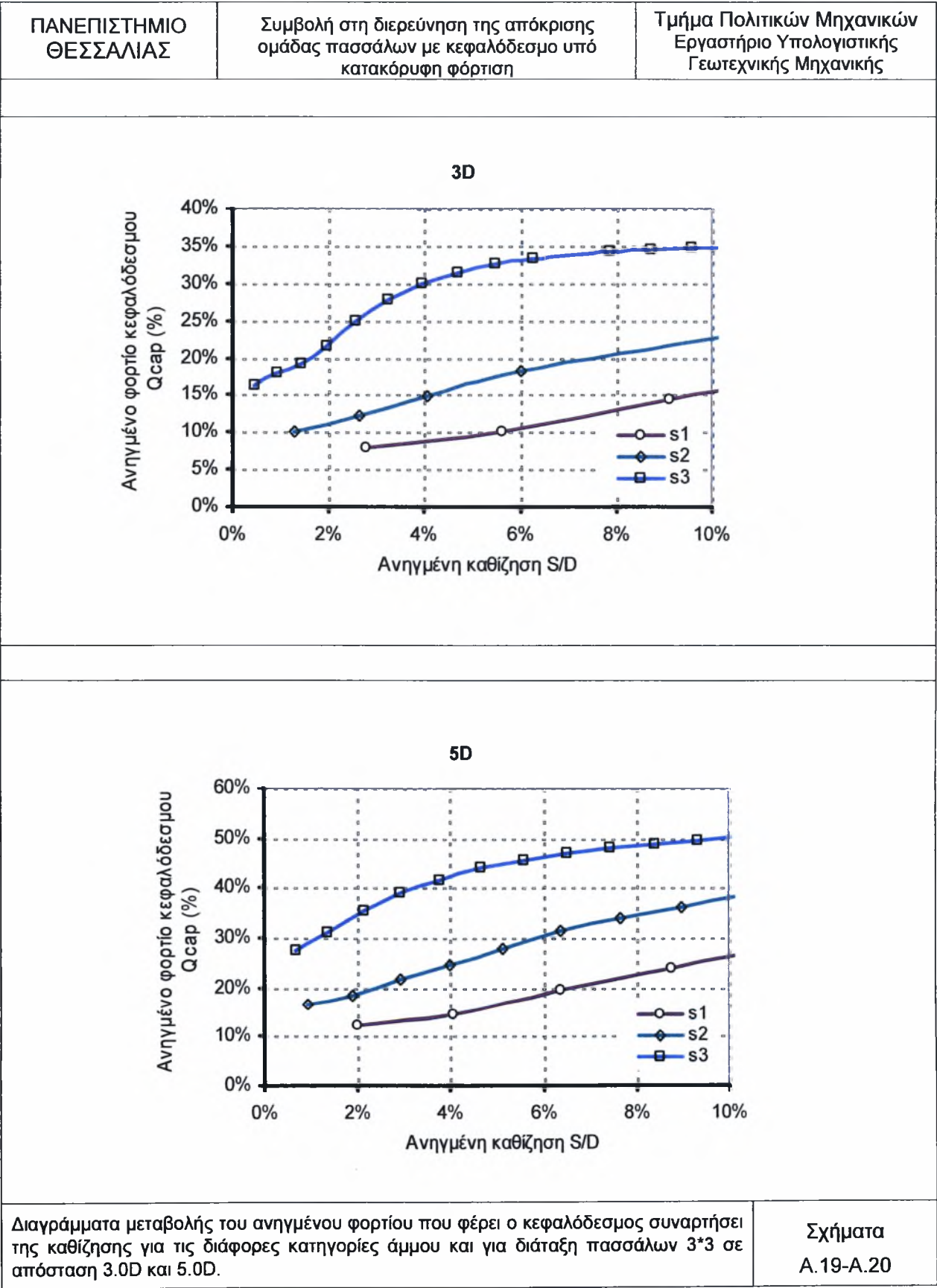


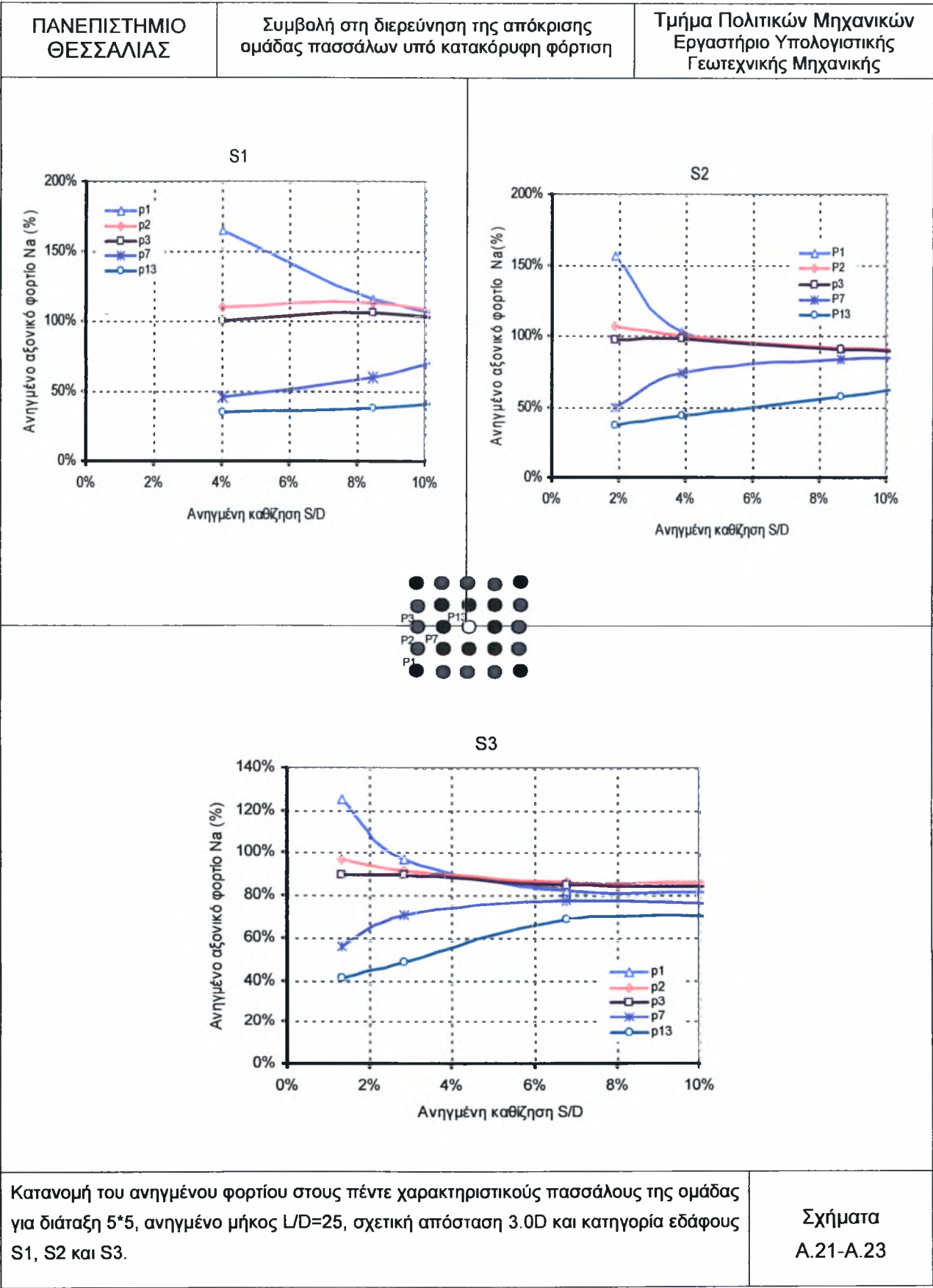


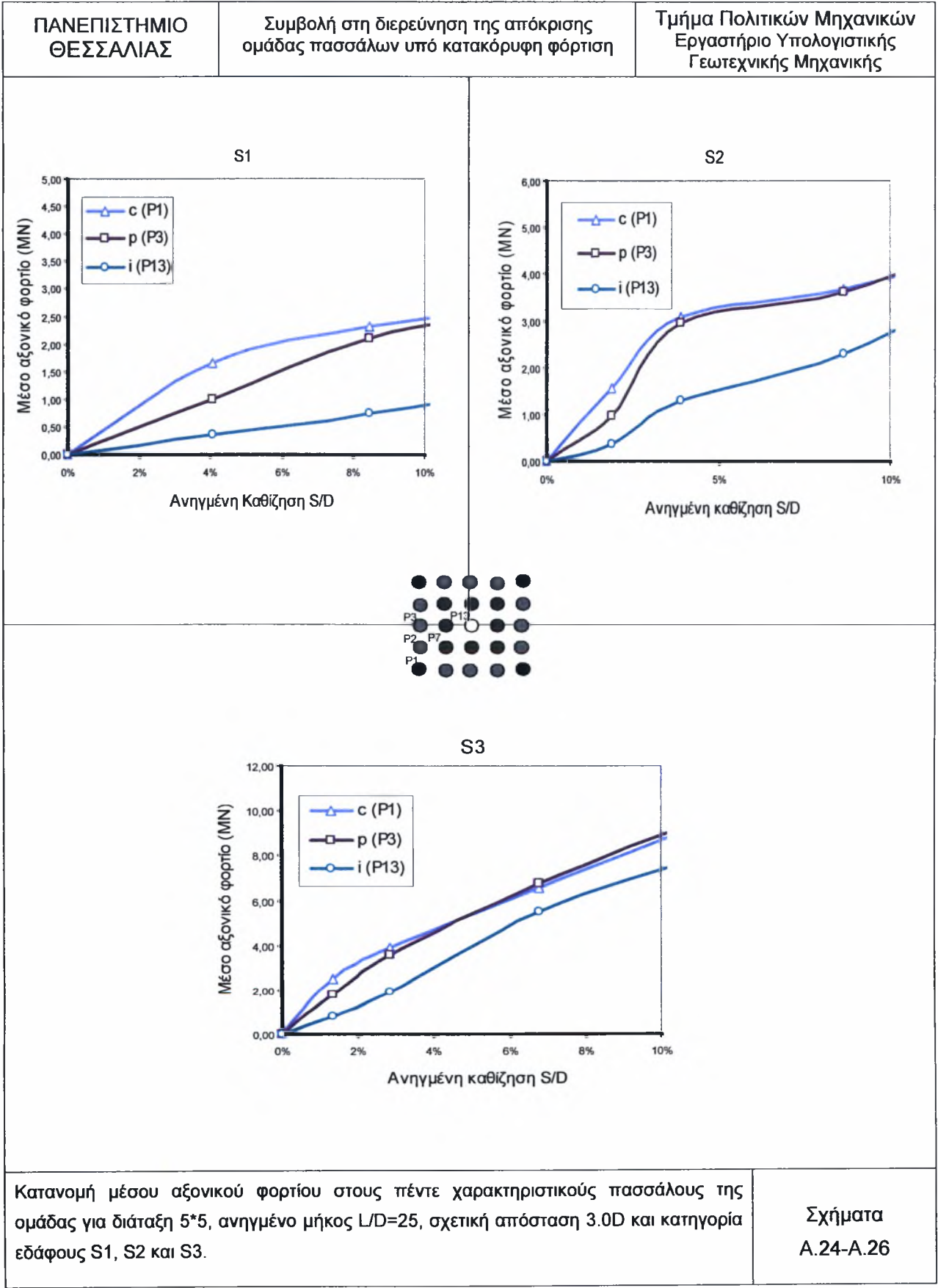
Διαγράμματα ανηγμένου αξονικού φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο και μη, μέσα σε αμμόδες έδαφος τύπου S1 με ανηγμένο μήκος L/D=25 για σχετικές αποστάσεις 3D και 5D.	Σχήματα A.11-A.12
---	----------------------

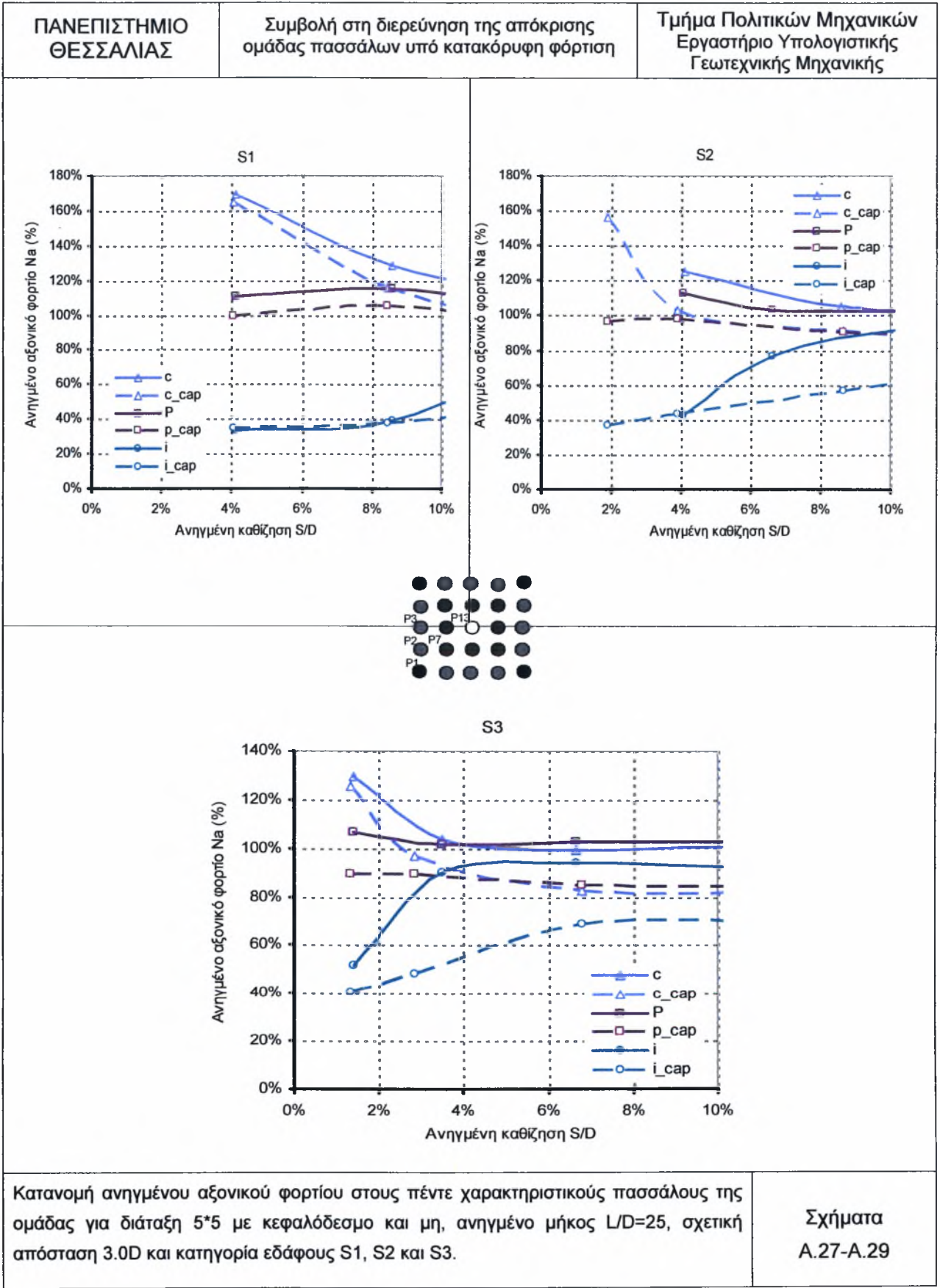


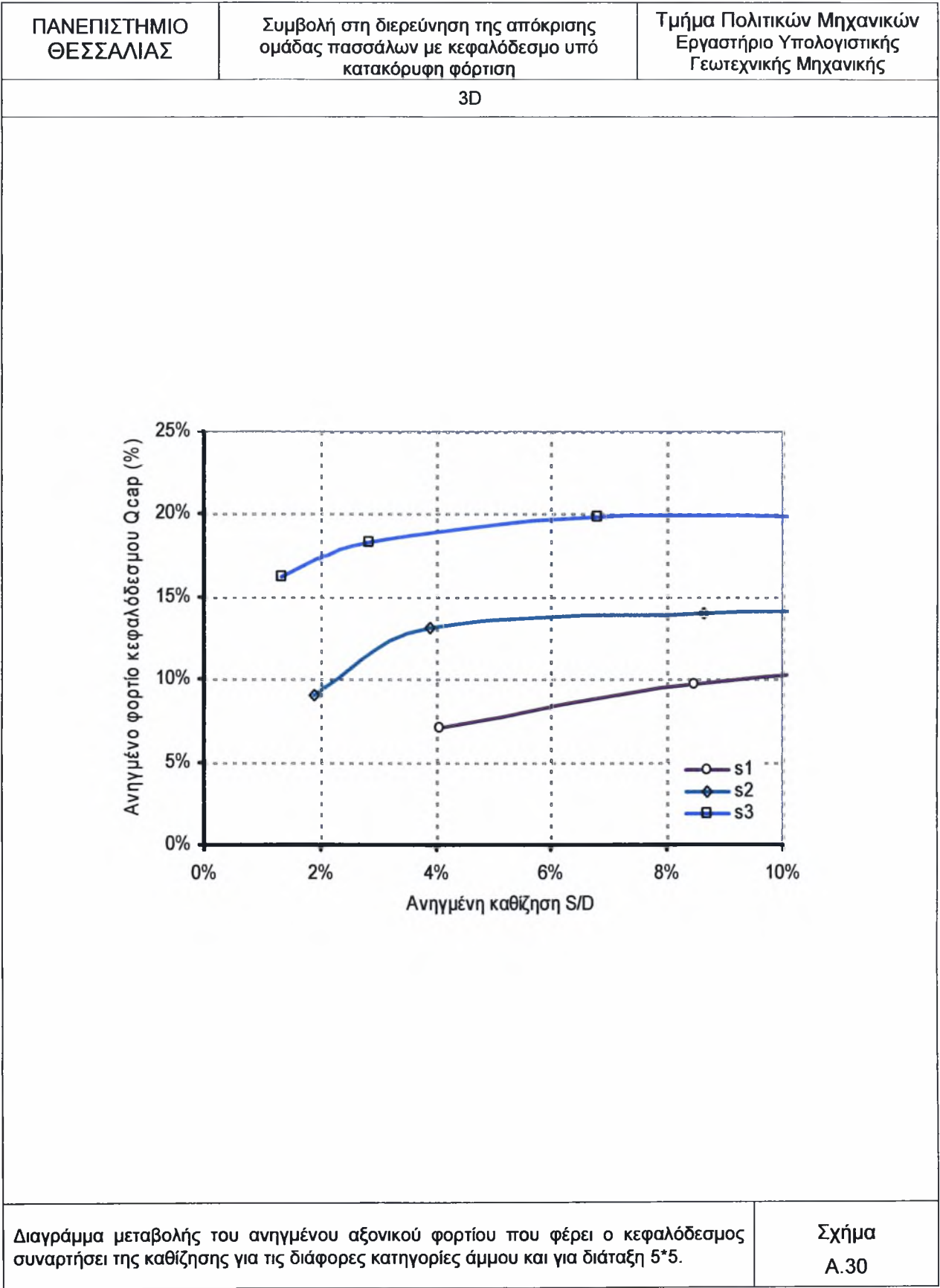
<p>ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ</p>	<p>Συμβολή στη διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με κεφαλόδεσμο υπό κατακόρυφη φόρτιση</p>	<p>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής</p>
<div data-bbox="252 334 1025 889"> <p>d=3D</p> </div>		
<div data-bbox="236 1100 1033 1659"> <p>d=5D</p> </div>		
<p>Διαγράμματα ανηγμένου αξονικού φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο και μη, μέσα σε αμμόδες έδαφος τύπου S1 με ανηγμένο μήκος L/D=25 για σχετικές αποστάσεις 3D και 5D.</p>		<p>Σχήματα Α.17-Α.18</p>







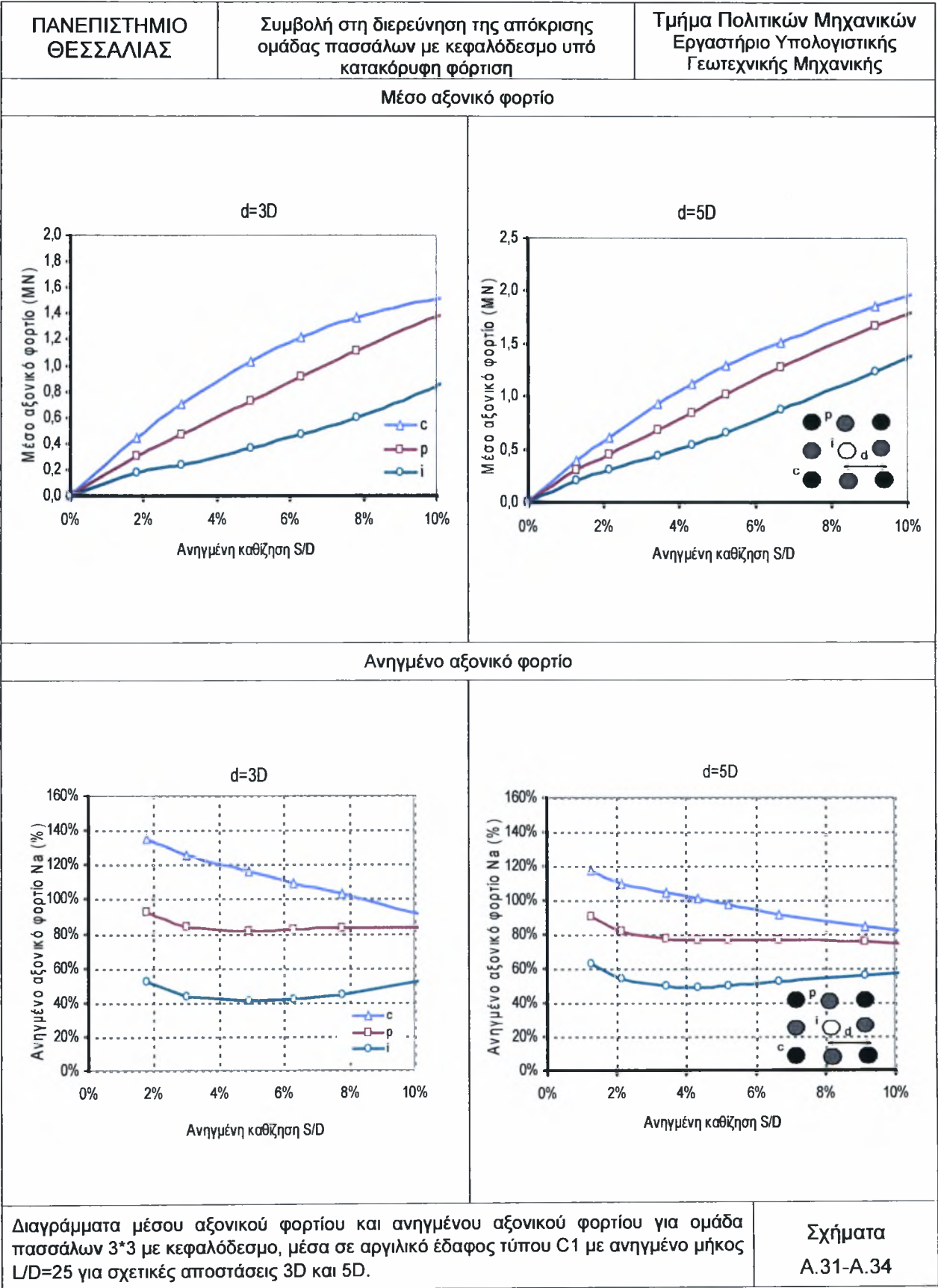


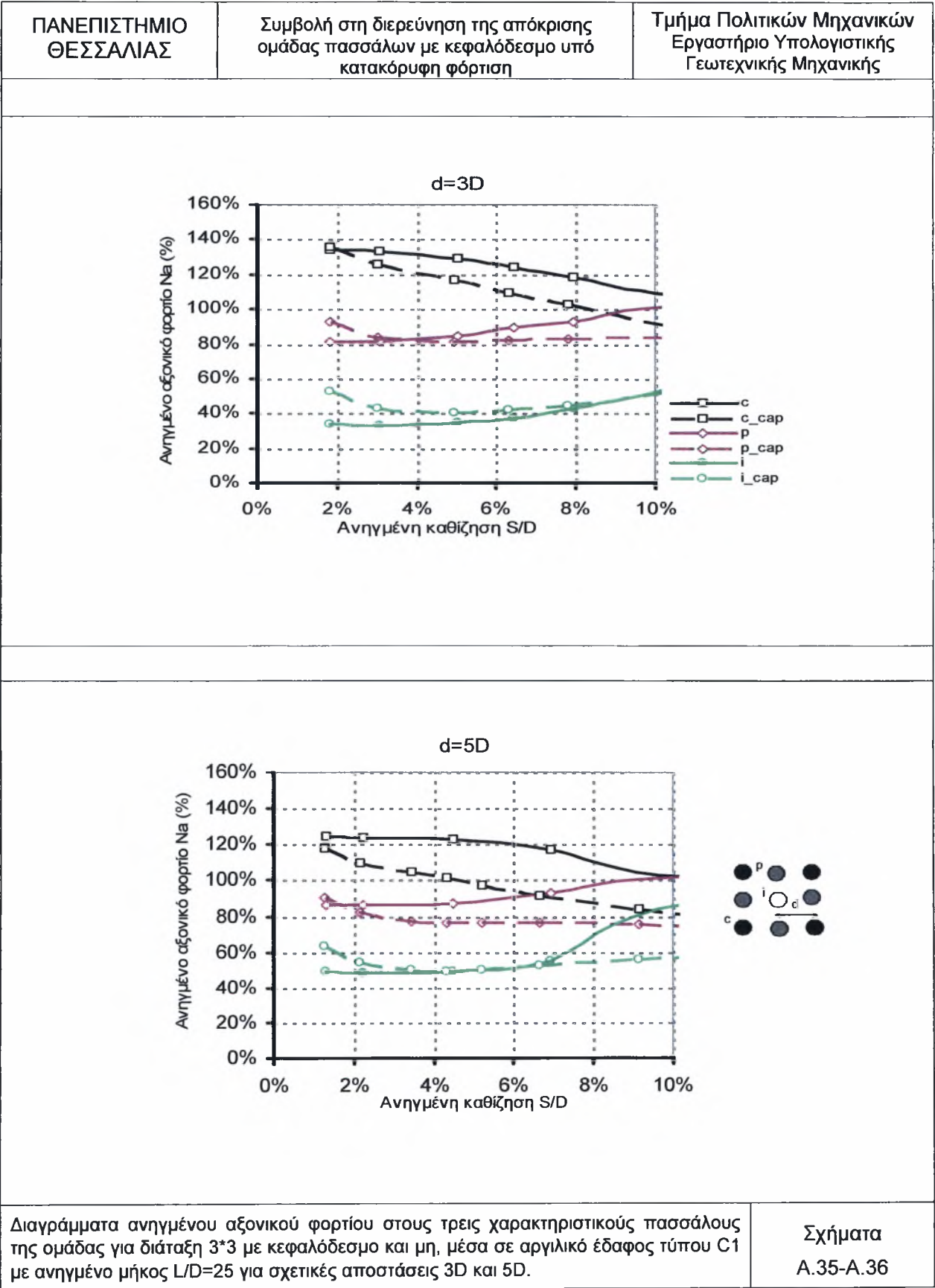


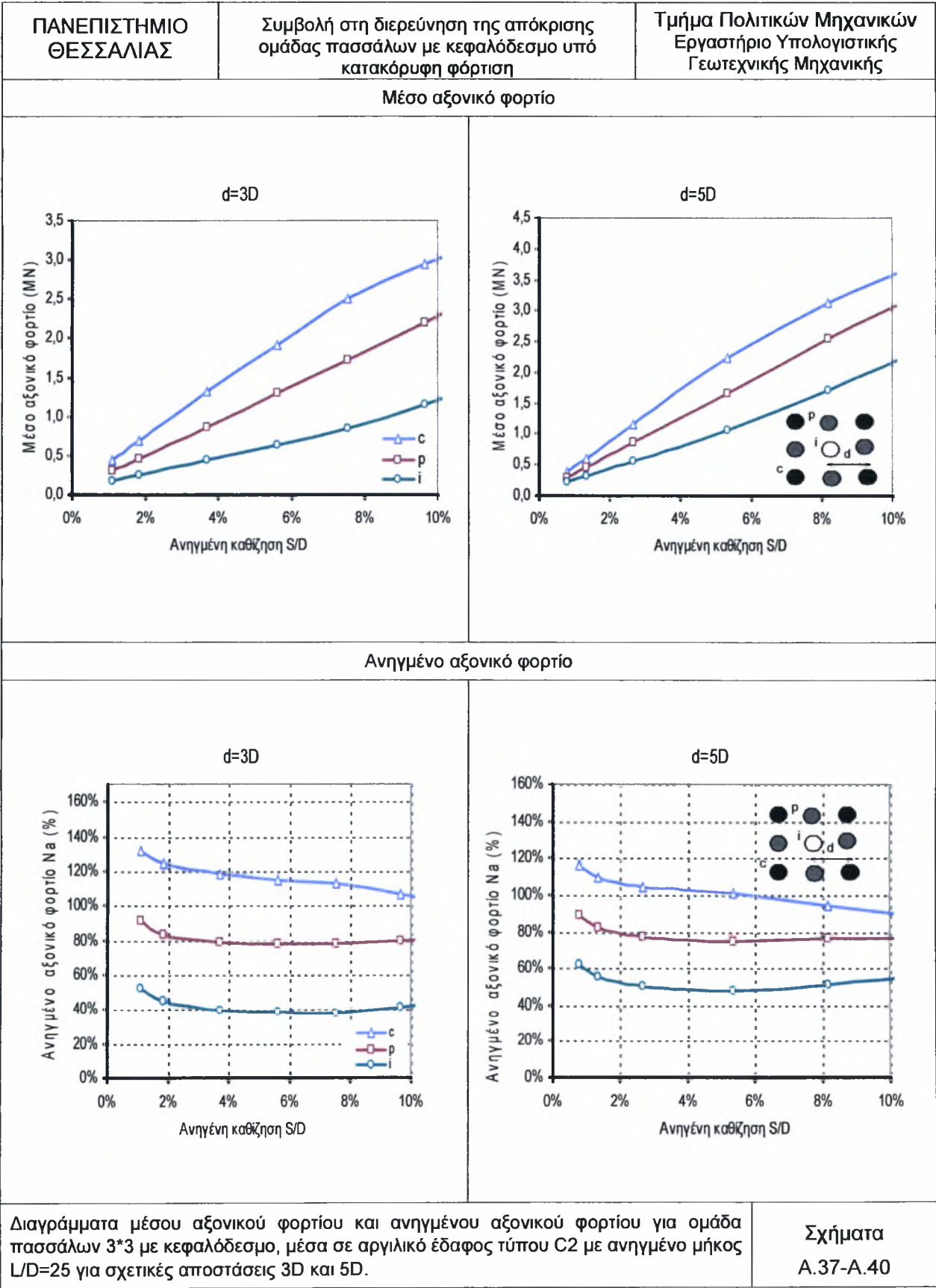
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

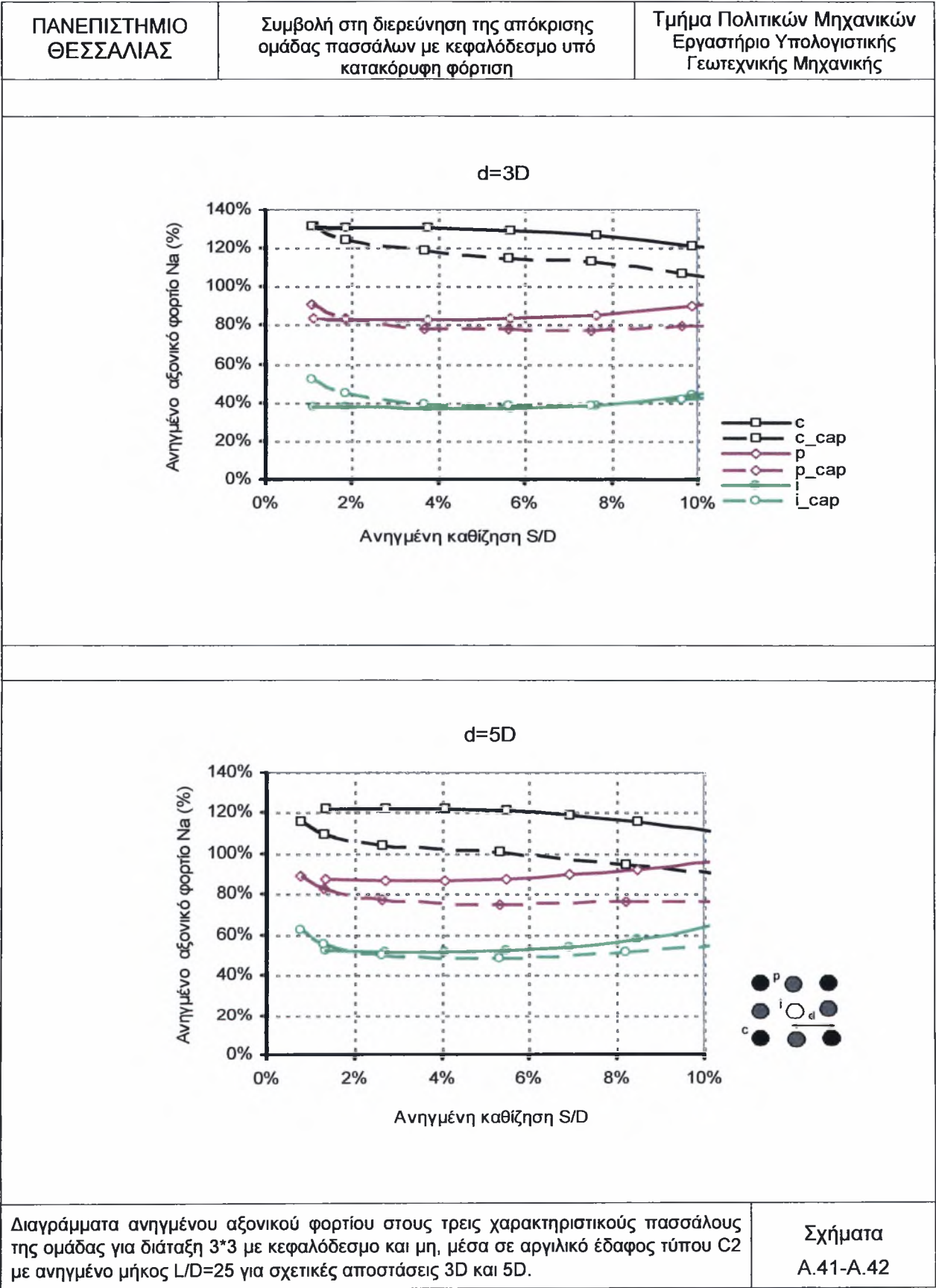
B

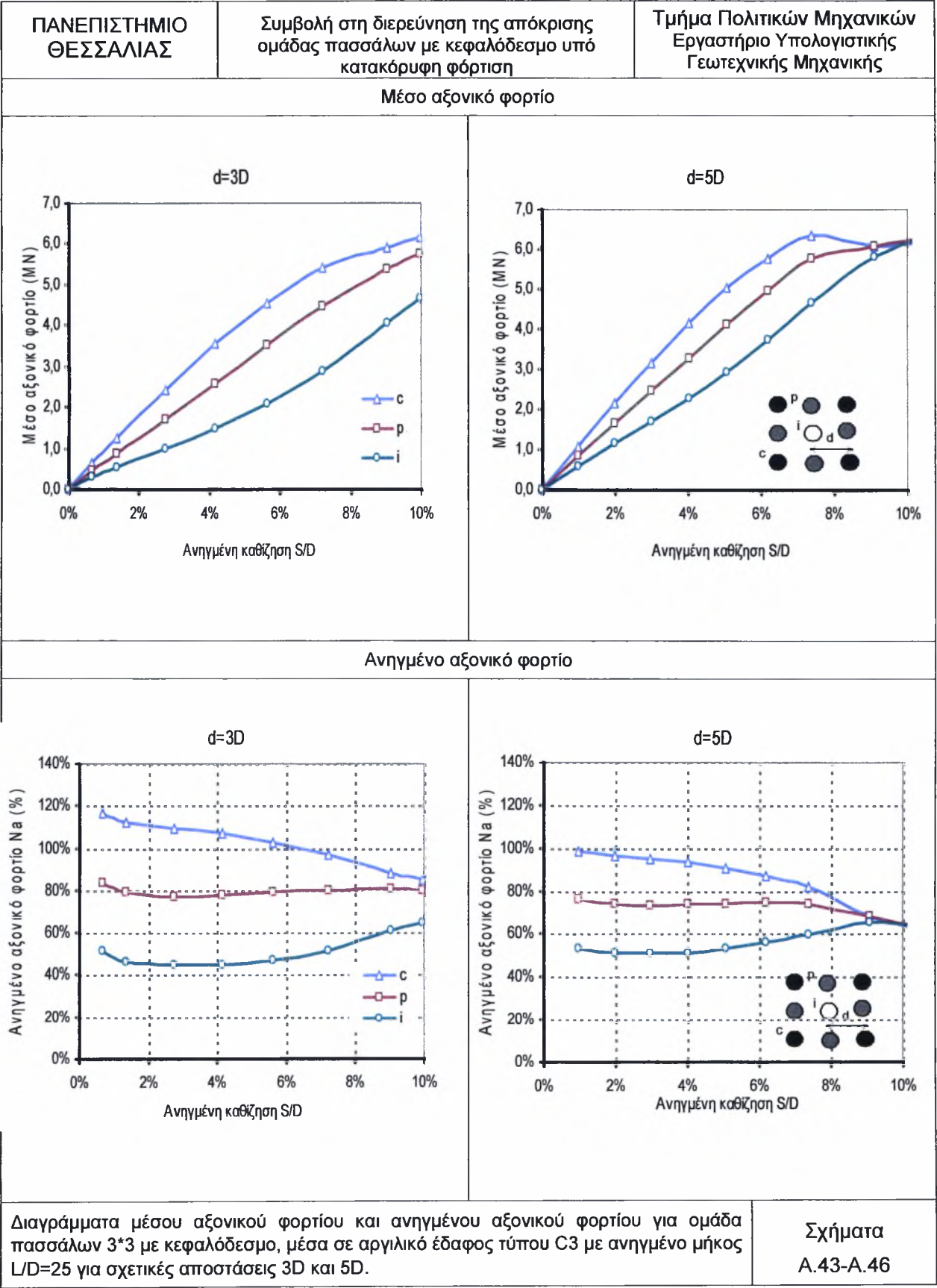
Διαγράμματα αργίλου



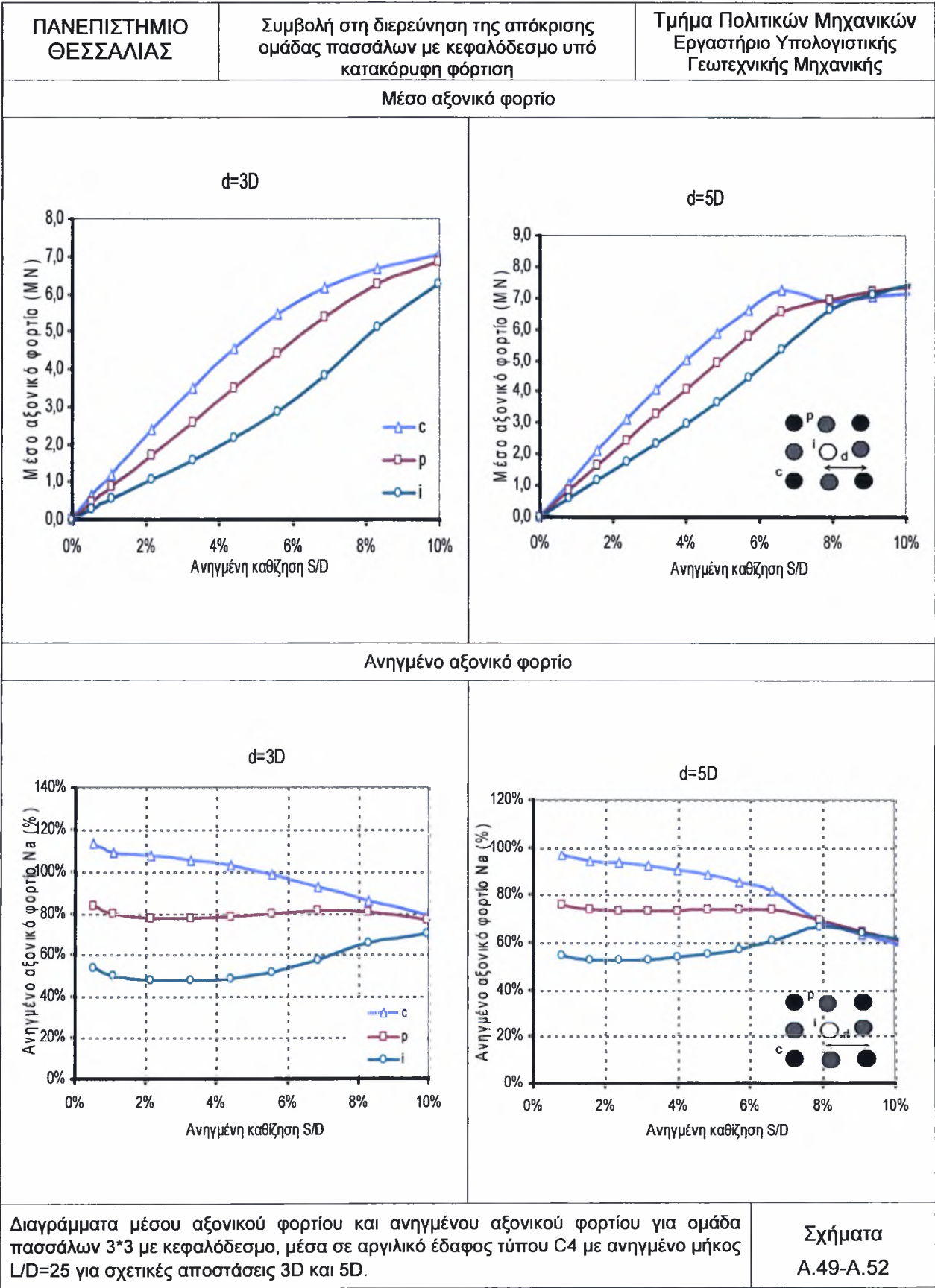






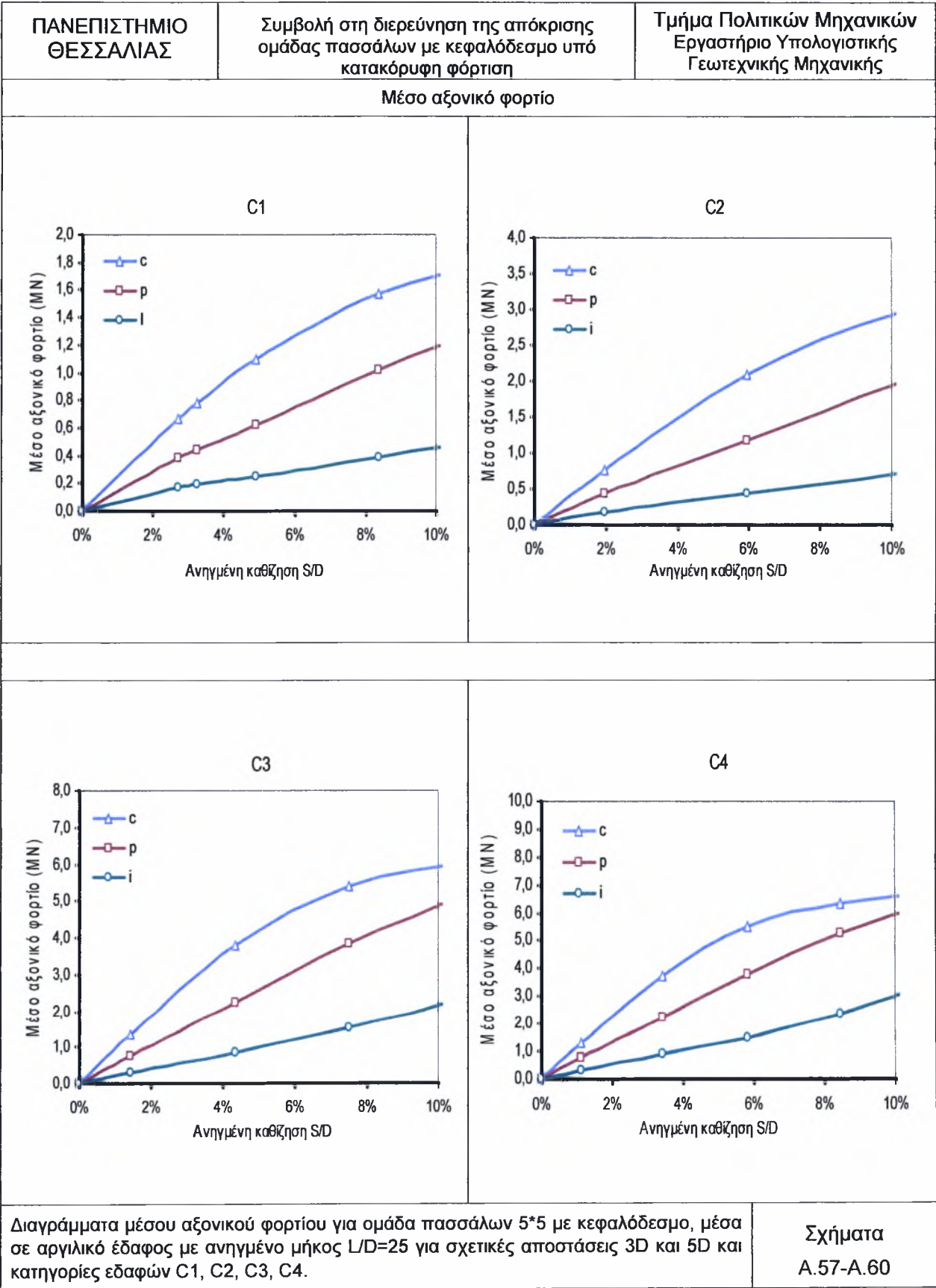


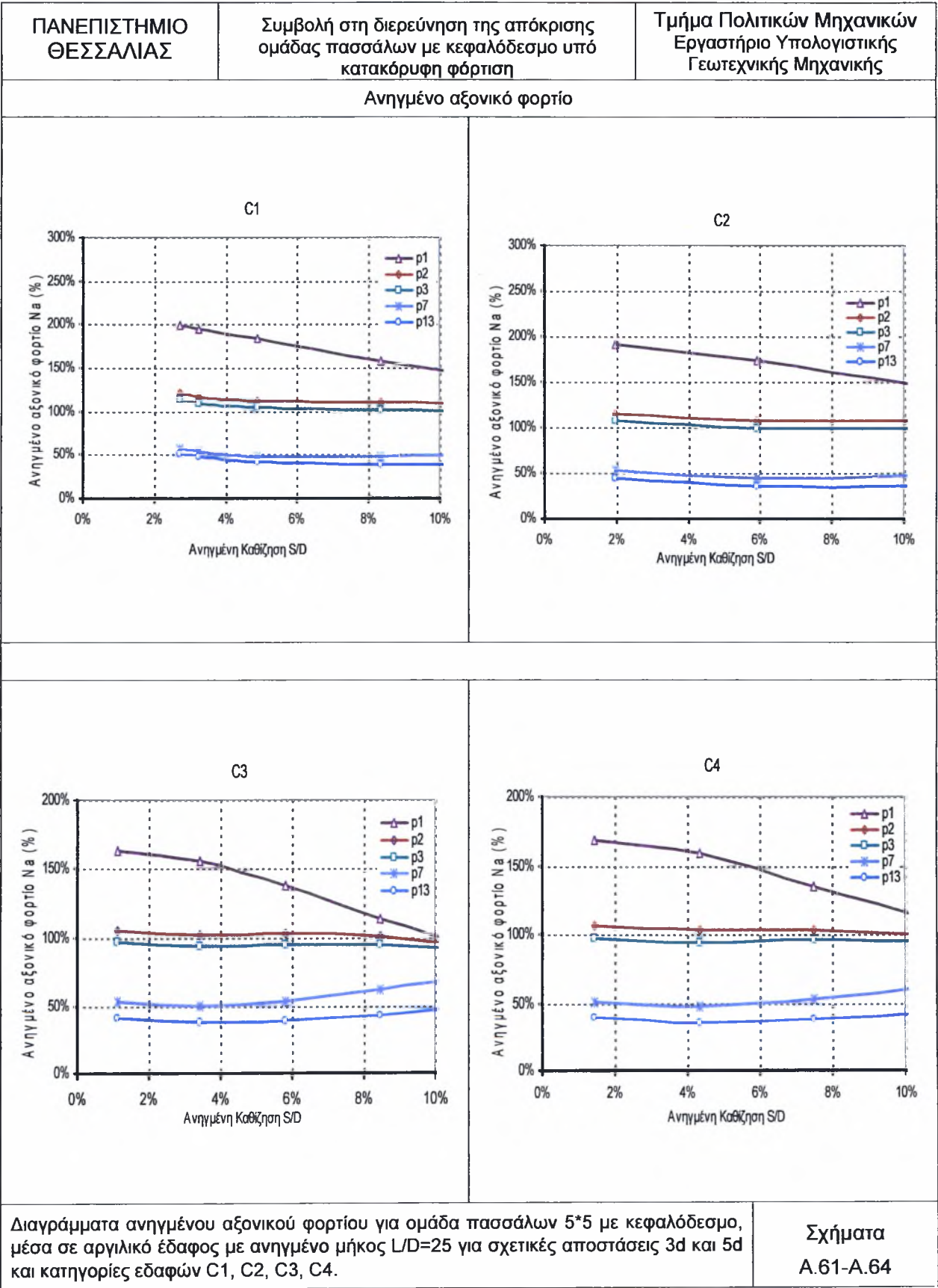
<p>ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ</p>	<p>Συμβολή στη διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με κεφαλόδεσμο υπό κατακόρυφη φόρτιση</p>	<p>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής</p>
<div data-bbox="299 334 1096 862"> <p>d=3D</p> </div>		
<div data-bbox="327 1104 1128 1657"> <p>d=5D</p> <div data-bbox="991 1435 1128 1542"> </div> </div>		
<p>Διαγράμματα ανηγμένου αξονικού φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο και μη, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C3 με ανηγμένο μήκος L/D=25 για σχετικές αποστάσεις 3D και 5D.</p>		<p>Σχήματα A.47-A.48</p>

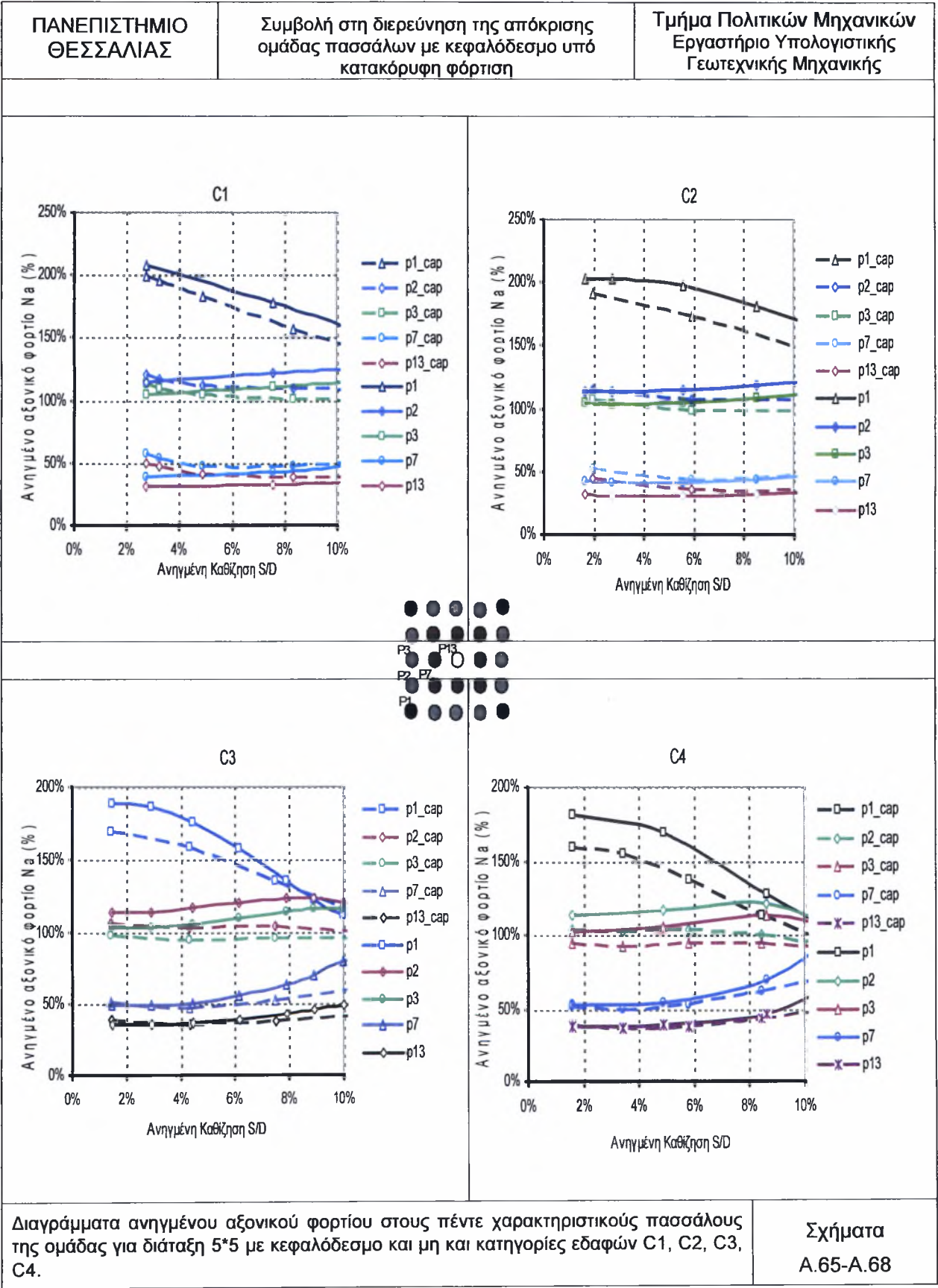


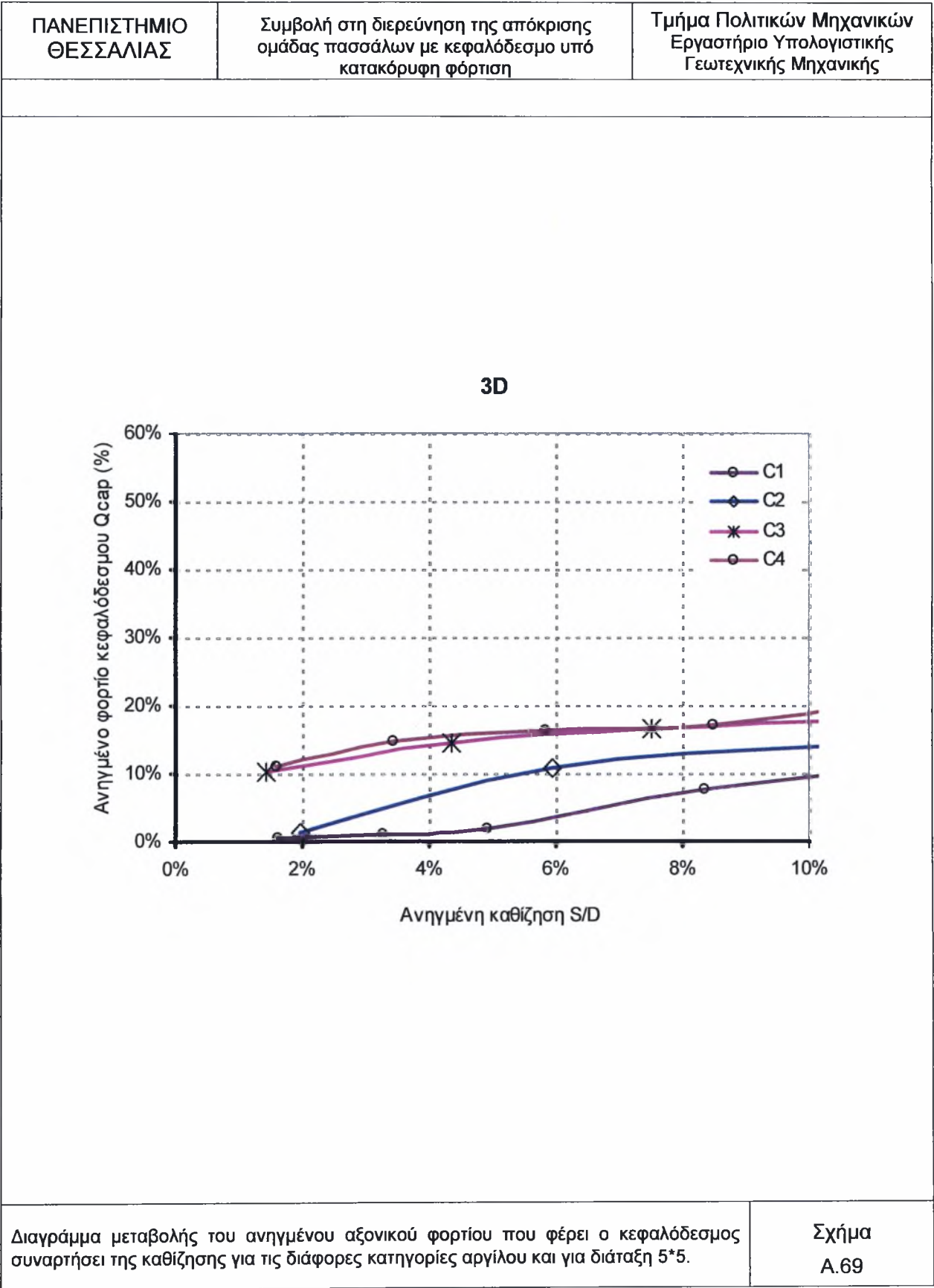
<p>ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ</p>	<p>Συμβολή στη διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με κεφαλόδεσμο υπό κατακόρυφη φόρτιση</p>	<p>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής</p>
<div data-bbox="295 332 1102 856"> <p>d=3D</p> </div>		
<div data-bbox="315 1078 1128 1663"> <p>d=5D</p> <div data-bbox="987 1421 1128 1552"> </div> </div>		
<p>Διαγράμματα ανηγμένου αξονικού φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο και μη, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C4 με ανηγμένο μήκος L/D=25 για σχετικές αποστάσεις 3D και 5D.</p>		<p>Σχήματα Α.53-Α.54</p>

<p>ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ</p>	<p>Συμβολή στη διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με κεφαλόδεσμο υπό κατακόρυφη φόρτιση</p>	<p>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής</p>
<div data-bbox="628 298 659 324">3D</div> <div data-bbox="239 374 1059 868"> </div>		
<div data-bbox="680 1096 710 1122">5D</div> <div data-bbox="249 1153 1059 1667"> </div>		
<p>Διαγράμματα μεταβολής του ανηγμένου φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος συναρτήσει της καθίζησης για τις διάφορες κατηγορίες αργίλου και για διάταξη πασσάλων 3*3 σε απόσταση 3.0D και 5.0D.</p>		<p>Σχήματα Α.55-Α.56</p>











ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091610